

Masterarbeit

Analyse digitaler Oberflächenmodelle aus multitemporalen hochauflösenden optischen Satellitendaten

angefertigt von

Florian Lang

Studiengang: Geomatik

Betreuer: Prof. Dr. Thomas Abmayr

Die Arbeit wurde angefertigt in Kooperation mit:



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Sommersemester: 2014

Abgabetermin: 02.06.2014

Analyse digitale Oberflächenmodelle aus multitemporalen
hochauflösenden optischen Satellitendaten

Analysis of digital surface models from multitemporal high
resolution satellite data

Florian Lang

Danksagung

Ich bedanke mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der GAF AG, die es mir ermöglichten, diese Arbeit in einem professionellen und freundschaftlichen Arbeitsumfeld anzufertigen. Dabei möchte ich meinen Betreuern Dipl. Geogr. Samuel Bärish und Dr. Sebastian Carl von der GAF AG besonders für Ihre Unterstützung danken.

Dank gilt auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen, die es mir gestatteten, das dortige Catena-Prozessierungssystem zu nutzen und mir dabei sehr behilflich waren.

Besonderer Dank gilt dabei meinem Betreuer am DLR, Dr. Pablo d'Angelo, der mir mit viel Geduld bei der Prozessierung der Testdaten geholfen hat, und mir viele Anregungen für diese Arbeit aufzeigte. Ebenso möchte ich mich bei Rolf Stätter bedanken, der mir durch seine Erfahrung mit Abschlussarbeiten viele nützliche Hinweise gegeben hat.

Prof. Dr.-Ing. Peter Reinartz möchte ich für die Ermöglichung des Aufenthalts und für die freundliche Aufnahme am Institut für Methodik der Fernerkundung am DLR Oberpfaffenhofen danken.

Ebenso will ich meinem Betreuer Prof. Dr. Thomas Abmayr an der Hochschule München danken, der mich nicht nur bei der Erstellung der Masterarbeit sondern auch während des Masterstudiums unterstützt hat.

Zuletzt möchte ich mich bei der Firma European Space Imaging bedanken, die mir erlaubten, die umfangreichen Testdaten für diese Arbeit zu verwenden.

Erklärung

gemäß § 15 Abs. 5 APO in Zusammenhang mit § 35 Abs. 7 RaPO

Hiermit erkläre ich, dass ich die Masterarbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Name: Lang

Vorname: Florian

Geburtsdatum: 14.09.1986

Studiengang: Geomatik

Studiengruppe: -

Matrikel-Nr.: 00425408

Sommersemester: 2014

Betreuer: Prof. Dr. Thomas Abmayr

Ort, Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Schlagwörter: *Satellitendaten; Stereorekonstruktion; Digitales Oberflächenmodell; Computer Vision; Semi-global Matching; Robuste Ähnlichkeitsmaße; Across-track Stereo; DSM Qualitätsanalyse; Tasking*

Das Segment der hochauflösenden (VHR), optischen Satellitensysteme ist über die letzten Jahre stark angewachsen, und vergrößert sich weiterhin. Mit der Anzahl der Aufnahmesysteme werden auch die Archive der Satellitenprovider immer größer. Gegenstand dieser Arbeit ist daher, zu untersuchen, wie das große Potential dieser Archive für die Satellitenbildphotogrammetrie nutzbar gemacht werden kann. Dafür werden mehrere zeitlich auseinanderliegende Aufnahmen zu digitalen Oberflächenmodellen (DSM) verarbeitet sowie die Ergebnisse bezüglich Genauigkeit und Vollständigkeit analysiert. Nur ein Bruchteil der VHR Aufnahmen wird im Stereomodus (bei dem zwei Aufnahmen kurz nacheinander getätigt werden) durchgeführt.

Für die Vermittlung des Prinzips, wie DSMs aus Satellitendaten erzeugt werden, wird in der Arbeit auf das Aufnahmeprinzip von optischen VHR Satelliten eingegangen. Dabei werden verschiedene Effekte vorgestellt, die vor oder bei der Prozessierung eines DSM aus optischen VHR Daten auftreten können. Um zu zeigen, wie aus zwei Bildern ein Tiefenbild bzw. ein DSM prozessiert wird, werden die Grundlagen der Computervision erläutert. Schwerpunkte bilden dabei die verschiedenen Ansätze zur Lösung des Korrespondenzproblems, Ähnlichkeitsmaße und die Semi-global Matching (SGM) Technik.

Aufnahmen, die kurz nacheinander aus einem Orbit aufgenommen werden (along-track stereo), besitzen nur wenige Unterschiede in ihrem Bildinhalt. Aufnahmen hingegen, die mehrere Tage, Monate oder Jahre auseinanderliegen (across-track stereo), weisen deutlich mehr Unterschiede auf. Dadurch, dass für die Erstellung von DSMs korrespondierende Punkte in mindestens zwei Bildern gefunden werden müssen (Matching), ist dieser Vorgang bei Aufnahmen mit großen zeitlichen Abständen schwierig und oft nicht erfolgreich. Durch die SGM Technik kann in Verbindung mit robusten Ähnlichkeitsmaßen ein qualitativ hochwertiges und genaues DSM abgeleitet werden. In dieser Arbeit wird mit Testdaten analysiert, unter welchen Umständen eine erfolgreiche Erstellung von Höhenmodellen aus across-track Aufnahmen möglich ist. Als Testdaten standen jeweils fünf Szenen des Satelliten Worldview-2 für zwei Testgebiete in Madrid und Tripolis zur Verfügung. Als Referenz dient im Testgebiet Madrid ein Lidar-Geländemodell.

Für die Analyse werden unterschiedliche Kombinationen von Aufnahmen verschiedener zeitlicher Abstände durch SGM zu DSMs prozessiert und quantitativ sowie qualitativ überprüft. Für diese Analysen werden robuste statistische Maße und etablierte Techniken zur visuellen Analyse verwendet. Die Analysen kommen zu dem Ergebnis, dass across-track erzeugte DSMs unter bestimmten zeitlichen und die Aufnahmewinkel betreffenden Voraussetzungen eine Qualität erreichen können, welche along-track DSMs ebenbürtig sind. Der zeitliche Abstand wirkt sich primär auf die Vollständigkeit bestimmter Objekttypen der resultierenden Höhenmodelle aus. Es wird neben den Ergebnissen der Analyse ein Vorschlag abgegeben, mit welchen Kriterien und auf welche Weise across-track Aufnahmen für eine erfolgreiche Erzeugung eines Höhenmodells ausgewählt werden können.

Abstract

Keywords: *Satellite Data; Stereo reconstruction; Digital Surface Model; Computer Vision; Semi-global Matching; Robust similarity measures; Across-track Stereo; DSM quality analysis; Tasking*

During the last few years, the segment of optical high resolution satellites has increased strongly and will continue to do so. Many optical VHR-Systems are planned to be launched in the future. Equally to the growing number of VHR-Systems, the amount of data in the satellite providers archives is growing rapidly. Due to the potential to use those Archives, the principal part of this thesis is to analyze the accuracy and completeness of digital surface models (DSM), processed out of multiple Images with different acquisition times.

In order to describe the principles of DSM production using VHR data, the image acquisition process of VHR Satellites is further described. Different Effects, which occur before or during the processing of DSMs are presented. In order to facilitate the principles of the process of creating a DSM out of two Images, the essentials of Computer vision are presented. An emphasis is placed on the different approaches of the correspondence-problem, similarity-measures and the semi-global matching (SGM) technique.

The difference of satellite images of the same target is related to the acquisition date and time between the images. Typically, the acquisition time difference of images taken in the same orbit (along-track stereo) is very short, which minimizes their content-related differences. Images with an acquisition time difference of several days, months or years (across-track) show much more and severe content-related differences. To reconstruct a surface from images, corresponding points have to be found in each image (Matching). Due to high acquisition time differences, this search for correspondence is very difficult, and often not successful. By using the SGM technique in combination with robust similarity measures, an accurate high quality DSM can be processed. In this thesis, an analysis on the success and dependencies of DSMs, processed by matching across-track satellite images, is performed. As test datasets, five Worldview-2 Scenes of Madrid, and five Worldview-2 scenes of Tripoli were available. A Lidar digital elevation model was available as reference data for the Madrid test dataset.

To process the DSMs for an analysis in terms of quality and quantity, many combinations of images with different acquisition times were processed with SGM. The Analysis was accomplished with robust statistics and visual analysis. Given some requirements regarding acquisition geometry and acquisition time difference, the analysis reveals the possibility to produce across-track DSMs with a comparable quality of along-track DSMs. The analysis also exhibits, that the acquisition time difference of the input images primarily affects the completeness of certain surface types. In addition to the analysis, a recommendation for decision-making is given, which explains the way of improving the process of image acquisition and image selection from the archives to meet the requirements for a successful processing of across-track images to DSMs.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

FORMELVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION	2
1.2	ZIEL DER ARBEIT	2
1.3	AUFBAU DER ARBEIT	3
1.4	LITERATUR	4
2	TECHNISCHE UND METHODISCHE GRUNDLAGEN.....	6
2.1	GENERIERUNG DIGITALER HÖHENMODELLE	6
2.1.1	<i>Höhenmodelle aus optischen Daten</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Effekte bei der Erstellung von Höhenmodellen aus optischen Daten.....</i>	<i>11</i>
2.1.3	<i>Aufbau und Funktion eines stereofähigen Satellitensystems</i>	<i>15</i>
2.2	AUFNAHMEGEOMETRIE UND KOMBINATIONSMÖGLICHKEITEN	24
2.2.1	<i>Winkel in der Stereoaufnahmegeometrie.....</i>	<i>24</i>
2.2.2	<i>Mehrfachstereo</i>	<i>26</i>
3	GRUNDLAGEN DER COMPUTERVISION	29
3.1	GRUNDLEGENDE MODELLE UND TECHNIKEN	30
3.1.1	<i>Stereogeometrie.....</i>	<i>30</i>
3.1.2	<i>Stereorekonstruktion</i>	<i>33</i>
3.2	SPEZIELLE METHODEN UND MAßE	39
3.2.1	<i>Ähnlichkeitsmaße</i>	<i>39</i>
3.2.2	<i>Semi-global Matching</i>	<i>43</i>
4	TASKINGSTRATEGIEN FÜR MULTITEMPORALE SATELLITENDATEN.....	46
4.1	NUTZEN DER ARCHIVE MODERNER STEREOFÄHIGER SATELLITENSYSTEME	48
4.1.1	<i>Übersicht der archivierten Daten moderner VHR-Systeme</i>	<i>49</i>
4.1.2	<i>Kombinationsmöglichkeiten von archivierten Daten</i>	<i>50</i>
4.2	MÖGLICHE WERKZEUGE ZUR ANALYSE UND PLANUNG	52
4.2.1	<i>Dynamik</i>	<i>52</i>
4.2.2	<i>Veränderung des Taskingvorgangs durch Verwendung von Archivdaten.....</i>	<i>54</i>
5	METHODEN ZUR ANALYSE UND PROZESSIERUNG	57
5.1	VISUELLE ANALYSEMETHODEN	58
5.1.1	<i>Analyse von Profillinien.....</i>	<i>59</i>
5.1.2	<i>Visueller Vergleich.....</i>	<i>59</i>
5.2	STATISTISCHE ANALYSEMETHODEN.....	61
5.2.1	<i>Vergleichbarkeit von optischen Höhenmodellen mit unterschiedlichen Referenzdaten.....</i>	<i>61</i>
5.2.2	<i>Fehlermaße</i>	<i>62</i>
5.2.3	<i>Residuenverteilung.....</i>	<i>63</i>

5.3	BERECHNUNG DER TESTDATEN	67
6	ERGEBNISSE UND ANALYSE.....	70
6.1	TESTGEBIET MADRID	70
6.1.1	<i>Beschreibung der Testdaten.....</i>	<i>71</i>
6.1.2	<i>Statistische Analyse.....</i>	<i>84</i>
6.1.3	<i>Visuelle Analyse</i>	<i>92</i>
6.1.4	<i>Ergebniseinschätzung.....</i>	<i>108</i>
6.2	TESTGEBIET TRIPOLIS	111
6.2.1	<i>Beschreibung der Testdaten.....</i>	<i>113</i>
6.2.2	<i>Statistische Analyse.....</i>	<i>117</i>
6.2.3	<i>Visuelle Analyse</i>	<i>118</i>
6.2.4	<i>Ergebniseinschätzung.....</i>	<i>128</i>
7	FAZIT UND AUSBLICK	130
8	QUELLENVERZEICHNIS	133

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: VERSCHIEDENE ARTEN DER VERZERRUNG	7
ABBILDUNG 2: UNTERSCHIED VON ALONG- UND ACROSS TRACK	10
ABBILDUNG 3: SKYPLOT DARSTELLUNG.....	11
ABBILDUNG 4: ORTHOBILDER MIT ZWEI JAHREN ABSTAND.....	12
ABBILDUNG 5: ARTEFAKTE AUF VERKEHRSWEGEN	13
ABBILDUNG 6: RADIOMETRISCHE EFFEKTE	14
ABBILDUNG 7: AUSWIRKUNGEN RADIOMETRISCHER UND MATCHING BEDINGTER EFFEKTE AUF DAS HÖHENMODELL.....	15
ABBILDUNG 8: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DES TDI-PRINZIPS	19
ABBILDUNG 9: VERDECKUNG.....	20
ABBILDUNG 10: SLEW TIME MODERNER VHR SENSOREN	21
ABBILDUNG 11: SKIZZE VIER AUF EINANDERFOLGENDER AUFNAHMEN	22
ABBILDUNG 12: FIXE AUFNAHMEWINKEL DES SATELLITEN CARTOSAT-1	24
ABBILDUNG 13: STEREOWINKEL IN DER STEREOGEOMETRIE	26
ABBILDUNG 14: ÜBERSICHT DER EPIPOLARGEOMETRIE.....	31
ABBILDUNG 15: EPIPOLARGEOMETRIE BEI AUFNAHMEN AUS DER LUFT ODER DEM WELTALL.....	33
ABBILDUNG 16: VERLAUF DER MATCHINGKOSTEN AN DER ENTSPRECHENDEN DISPARITÄTSPOSITION	35
ABBILDUNG 17: DISPARITÄTSBILD.....	36
ABBILDUNG 18: VORSTELLUNG DES CENSUS ÄHNLICHKEITSMABES.....	42
ABBILDUNG 19: PFADE DES SEMI-GLOBAL MATCHING	44
ABBILDUNG 20: SUCHE VON DISPARITÄTEN AUF BILDPYRAMIDEN	45
ABBILDUNG 21: FOOTPRINTS VON STEREOAUFNAHMEN DES SATELLITEN WORLDVIEW-1 BIS 18.2.2014.....	49
ABBILDUNG 22: HISTOGRAMM DER VERTEILUNG VON RESIDUEN.....	63
ABBILDUNG 23: KURTOSIS UND SKEWNESS.....	64
ABBILDUNG 24: BEISPIEL EINES QQ PLOTS	65
ABBILDUNG 25: ERLÄUTERUNG DES NMAD FEHLERMAßES.....	66
ABBILDUNG 26: ABLAUFDIAGRAMM DER MULTISTEREOPROZESSIERUNG IN CATENA.....	68
ABBILDUNG 27: FOOTPRINTS DER AUFNAHMEN IM TESTGEBIET MADRID	70
ABBILDUNG 28: LAGE DES STREIFENS MIT FÜNF ÜBERLAPPENDEN SZENEN, MADRID.....	71
ABBILDUNG 29: AUFNAHMEKONSTELLATION DES TESTGEBIETS MADRID ALS SKYPLOT	72
ABBILDUNG 30: KLIMADIAGRAMM VON MADRID MIT AUFNAHMEZEITPUNKTEN DER SATELLITENBILDER.....	74
ABBILDUNG 31: ÜBERSICHT DER AUSSCHNITTE IM TESTGEBIET MADRID	75
ABBILDUNG 32: DETAILANSICHT DER AUSSCHNITTE DES TESTGEBIETS MADRID	76
ABBILDUNG 33: AUSSCHNITT "ZENTRUM"	76
ABBILDUNG 34: PLOT DES EGM96 GEOIDS	79
ABBILDUNG 35: ANSICHT DES LIDAR-MODELLS UND EINES MASKIERTEN BEREICHS.....	79
ABBILDUNG 36: 3D-SCHRÄGANSICHT DES TESTAUSSCHNITTS „KREUZUNG“	80
ABBILDUNG 37: 3D-SCHRÄGANSICHT DES LIDAR-GELÄNDEMÖDELLS.....	81
ABBILDUNG 38: ZUSÄTZLICHE MASKIERUNG EINZELNER AUSSCHNITTE.....	81
ABBILDUNG 39: HISTOGRAMME, QQ PLOTS, ABWEICHUNGEN DER TESTGEBIETE	84
ABBILDUNG 40: VOLLSTÄNDIGKEITEN DER VORGESCHLAGENEN KOMBINATIONEN.....	85
ABBILDUNG 41: BEISPIEL FÜR VERDECKTE BZW. NICHT GEMATCHTE BEREICHE	86
ABBILDUNG 42: PLOT DER VOLLSTÄNDIGKEIT DER TESTGEBIETE SOWIE NMAD	88
ABBILDUNG 43: PLOT DER ERGEBNISSE DER TESTGEBIETE VS. LIDAR, 95% - QUANTIL	89

ABBILDUNG 44: PLOT DER ERGEBNISSE DER TESTGEBIETE VS. LIDAR, 68,3% - QUANTIL	89
ABBILDUNG 45: PLOT DER VOLLSTÄNDIGKEIT DER TESTGEBIETE SOWIE NMAD	90
ABBILDUNG 46: PLOTS DER QUANTILE, MEAN UND STANDARDABWEICHUNGEN ZUM HÖHENMODELL 5-6	91
ABBILDUNG 47: AUSWIRKUNGEN VON FAHRZEUGEN AUF DAS DSM	93
ABBILDUNG 48: AUSWIRKUNG VERÄNDERTER GEBÄUDETEILE AUF DAS DSM	95
ABBILDUNG 49: AUSWIRKUNGEN ZEITLICHER ABSTÄNDE AUF DIE VEGETATION IM DSM.....	96
ABBILDUNG 50: PANGESCHÄRFTES NADIRNAHES ORTHOPHOTO	97
ABBILDUNG 51: AUSWIRKUNGEN ZEITLICHER ABSTÄNDE AUF ANTHROPOGENE FEATURES	98
ABBILDUNG 52: AUSWIRKUNG ZEITLICHER ABSTÄNDE AUF NATÜRLICHE BEREICHE.....	99
ABBILDUNG 53: PROFILLINIE UND PROFILSCHNITT DURCH EINEN BRACHLIEGENDEN BEREICH	99
ABBILDUNG 54: AUSWIRKUNGEN ZEITLICHER ABSTÄNDE AUF ASPHALTIERTE BEREICHE.....	101
ABBILDUNG 55: VORSTELLUNG EINES DETAILAUSSCHNITTS	102
ABBILDUNG 56: DARSTELLUNG DER HÖHENMODELLE DES DETAILAUSSCHNITTS.....	103
ABBILDUNG 57: HÖHENPROFILE DES DETAILAUSSCHNITTS	104
ABBILDUNG 58: DARSTELLUNG EINZELNER HÖHENMODELLE DES DETAILAUSSCHNITTS.....	105
ABBILDUNG 59: HÖHENMODELL 5-6, DETAILAUSSCHNITT	106
ABBILDUNG 60: WEITERE HÖHENMODELLE FÜR DEN VERGLEICH DES DETAILAUSSCHNITTS.....	107
ABBILDUNG 61: PROFIL UND PROFILSCHNITT MEHRERER BÄUME	107
ABBILDUNG 62: SCHRÄGANSICHT DES BEREICHS UM DIE PROFILLINIE.....	108
ABBILDUNG 63: ZUSAMMENHANG DES ANTEILS DER VOIDBEREICHE UND DES ZEITABSTANDES DER EINGEFLOSSENEN BILDER.	110
ABBILDUNG 64: SKYLOT DER VERFÜGBAREN SZENEN DES TESTGEBIETS TRIPOLIS	111
ABBILDUNG 65: ÜBERSICHT DES FOOTPRINTS DER SZENEN IM TESTGEBIET TRIPOLIS	112
ABBILDUNG 66: KOMPLETTE ANSICHT DES ABGEBILDETEN GEBIETS	112
ABBILDUNG 67: KLIMADIAGRAMM VON TRIPOLIS	115
ABBILDUNG 68: AUSSCHNITTE IM TESTGEBIET TRIPOLIS.....	116
ABBILDUNG 69: VOLLSTÄNDIGKEITEN DER TESTGEBIETE BZW. KOMBINATIONEN IM TESTGEBIET TRIPOLIS	117
ABBILDUNG 70: PRÄSENTATION DES AUSSCHNITTS „WOHNGEBIET“	119
ABBILDUNG 71: DETAILAUSSCHNITT DES TESTGEBIETS „WOHNGEBIET“	120
ABBILDUNG 72: PRÄSENTATION DES AUSSCHNITTS „VEGETATION“	121
ABBILDUNG 73: PROFILANSICHT EINES PROFILS IM TESTGEBIET „VEGETATION“	122
ABBILDUNG 74: 3D-ANSICHT EINES DETAILAUSSCHNITTS MIT PROFILLINIE	122
ABBILDUNG 75: PRÄSENTATION DES AUSSCHNITTS „INDUSTRIE“	123
ABBILDUNG 76: 3D-ANSICHT EINES DETAILAUSSCHNITTS DES TESTGEBIETS „INDUSTRIE“	124
ABBILDUNG 77: PRÄSENTATION DES AUSSCHNITTS „BRACHLAND“	125
ABBILDUNG 78: DETAILANSICHT EINES AUSSCHNITTS IM TESTGEBIET „BRACHLAND“	126
ABBILDUNG 79: PRÄSENTATION DES AUSSCHNITTS „FLUGHAFEN“	127

Formelverzeichnis

#	Formel	Beschreibung / Quelle	Seite
(1)	$c_n = \frac{\sum_{i=1}^{20} Samp_Num_Coef_i * \rho(\varphi, \lambda, h)}{\sum_{i=1}^{20} Samp_Den_Coef_i * \rho(\varphi, \lambda, h)}$ $r_n = \frac{\sum_{i=1}^{20} Line_Num_Coef_i * \rho(\varphi, \lambda, h)}{\sum_{i=1}^{20} Line_Den_Coef_i * \rho(\varphi, \lambda, h)}$	Transformation von φ, λ, h zu row und column (Zeile & Spalte) nach NGA, 2011	16
(2)	$r_n = \frac{F_1(\varphi, \lambda, h)}{F_2(\varphi, \lambda, h)}$ $c_n = \frac{F_3(\varphi, \lambda, h)}{F_4(\varphi, \lambda, h)}$	Vereinfachte Form von (1) Notation angepasst, nach FRASER & HANLEY (2005), GRODECKI UND DIAL (2003)	16
(3)	$Line_i^{(j)} = \Delta p^{(j)} + \Delta p^{(j)} (\varphi_k, \lambda_k, h_k) + \varepsilon_{L_i}$ $Sample_i^{(j)} = \Delta r^{(j)} + \Delta r^{(j)} (\varphi_k, \lambda_k, h_k) + \varepsilon_{S_i}$	Affintransformation bez. des RPC Modells nach GRODECKI & DIAL (2003)	16
(4)	$\cos \alpha = \sin \omega_1 * \sin \omega_2 + \cos \omega_1 * \cos(\delta_1 - \delta_2)$	Berechnung des Konvergenzwinkels nach CAIN (1989)	17
(5)	$\frac{p_r - p_l}{Z - f_k} = \frac{d_b}{Z}$	Ähnlichkeitsbeziehung in der rektifizierten Standardstereogeometrie	32
(6)	$\frac{d_b + d}{Z - f_k} = \frac{d_b}{Z}$	(5) Wenn für $x_l := p_l$ und $x_r := d_b - p_l$; $d = x_l - x_r$ gilt	32

(7)	$ I_l(x, y) - I_r(x + d, y) $	Pixelweise Matchingkosten der absoluten Intensitätsunterschiede	34
(8)	$E(d) = E_d(d) + \lambda E_s(d)$	Energiefunktional mit Datenterm $E_d(d)$ und Smoothnessterm $E_s(d)$ nach SZELISKI (2011).	38
(9)	$MI_{I_1 I_2} = H_{I_1} + H_{I_2} - H_{I_1 I_2}$	Definition von Mutual Information aus HIRSCHMÜLLER (2005)	41
(10)	$C_{MIC}(p, d) = w_{MI} * C_{MI} + (1 - w_{MI}) * C_{Census}(p, d)$	MIC Matchingkosten, gewichtete Kombination aus Census und Mutual Information nach ZHU ET AL., 2012	43
(11)	$E(D) = \sum_p (C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[D_p - D_q = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[D_p - D_q > 1])$	Semi-global Matching, nach HIRSCHMÜLLER (2005)	43
(12)	$MAD = median_j(\Delta h - median(\Delta h))$	Median der absoluten Abweichung, Verändert nach HOAGLIN ET AL., 2000	66
(13)	$Nmad = 1,4826 * MAD$	Normalisierte Form von (28), nach HÖHLE & HÖHLE 2009	66

1 EINLEITUNG

Die Fernerkundung bietet mit dem Teilbereich der Photogrammetrie einen Zweig, der sich nicht nur mit der planaren Abbildung und Untersuchung der Oberfläche beschäftigt, sondern auch die Höhe miteinbezieht. Am Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Photogrammetrie zum ersten Mal für die Auswertung von analogen Luftbildaufnahmen verwendet. Seit der Einführung digitaler, hochauflösender (VHR) optischer Satelliten und luftgestützter optischer VHR Systeme können neben der Ableitung des Geländes auch einzelne Objekte auf der Oberfläche dreidimensional rekonstruiert werden. Für die Rekonstruktion von Höhenwerten müssen in den Eingangsbildern korrespondierende Punkte gefunden werden. Durch die unterschiedlichen Positionen dieser Punkte in den einzelnen Bildern kann ein Höhenwert ermittelt werden. Das Resultat stellen digitale Oberflächenmodelle (DSM) dar. In der Satellitentechnik erreichte das System IKONOS erstmals eine Bodenauflösung von unter einem Meter. Seitdem folgten zahlreiche leistungsfähige optische Systeme, zum Beispiel Geoeye-1, Worldview-1 & 2, Spot 6 und Pleiades-1A und 1B, die sich bereits seit einiger Zeit im Orbit der Erde befinden. In naher Zukunft wird dieses Segment durch weitere, hochauflösende Satelliten, wie zum Beispiel Spot 7, und Worldview-3, sowie durch Systeme mit Videoaufzeichnungsfunktion wie zum Beispiel die Konstellation Skybox und das Urthecast-Projekt ergänzt. Weitere Systeme dieser Auflösungsklasse liefern auch ohne Stereoaufzeichnungsmöglichkeit Archivbilder, die sich eventuell zu Stereopaaren kombinieren lassen. Dieses wachsende Angebot an hochauflösenden Satelliten lässt die Archive der Satellitenprovider stark anwachsen. So besitzen bereits viele Bereiche der Erde, insbesondere urbane Bereiche, jetzt schon Abdeckungen mit Hunderten von einzelnen Szenen.

Um aus mehreren Bildern Tiefeninformationen und somit digitale Oberflächenmodelle extrahieren zu können, forscht die Disziplin der Computer Vision an Algorithmen, die Tiefeninformationen robust, schnell und möglichst dicht rekonstruieren können. Die Semi-global Matching (SGM) Technik, welche sich seit 2008 als robuste und schnelle Alternative zu anderen Algorithmen für die Rekonstruktion von flächendeckenden Tiefeninformationen aus Stereobildern herausstellte, wird bereits in vielen Bereichen eingesetzt. DSMs werden für viele Anwendungszwecke herangezogen, in welchen ein dreidimensionales Modell oder Höheninformationen eines Bereichs benötigt werden. Anwendungen liegen beispielsweise in der Planung von Windkraftanlagen und von Funkmasten, in der Volumenschätzung, der Verkehrsplanung, dem Umwelt Monitoring, dem Katastrophenschutz und in zahlreichen anderen Bereichen. DSMs aus Satellitendaten bieten den großen Vorteil, dass die Einzelbilder für die Ableitung sehr viel leichter und günstiger zu beschaffen sind als die aus luftgestützten Systemen. Dafür werden beim Einsatz aktueller hochauflösender Satellitensysteme mehrere Aufnahmen kurz nacheinander aus verschiedenen Positionen getätigt. Alle Aufnahmen der Satellitenprovider wandern nach kurzer Zeit in die Archive der Provider, wo sie meist zu einem Bruchteil des Preises einer Neuaufnahme verkauft werden. Für einige Regionen ist es jedoch schwierig, mehrere Neuaufnahmen eines Bereichs aus einem Orbit tatsächlich zu bekommen (z.B. wegen klimatischer Bedingungen, geographischer Breite oder der begrenzten Aufnahmekapazität der Systeme). Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit untersucht, ob es möglich ist, Archivaufnahmen verschiedener Aufnahmezeitpunkte zu kombinieren, und daraus ein Höhenmodell zu rekonstruieren. Zusätzlich wird überprüft, wie sich der Planungsvorgang dabei verändern lässt, um möglichst effizient Aufnahmen für ein Höhenmodell auszuwählen. Durch den zeitlichen Abstand der Aufnahmezeitpunkte bei der Verwendung von Archivdaten oder von Kombinationen mit Neuaufnahmen kann es dazu

kommen, dass sich Objekte in der Zeit zwischen den Aufnahmezeitpunkten verändert haben. In der Analyse der Testdaten werden zeitliche Grenzen für verschiedene Objektarten festgestellt, ab denen der entsprechende Objekttyp nicht mehr gut rekonstruierbar ist. Dazu wird eine Empfehlung für eine Rekonstruktion aus Aufnahmen in mediterranen Regionen gegeben.

1.1 Motivation

Digitale Höhenmodelle aus optischen Satellitenbildern werden für unzählige Anwendungszwecke benötigt. Daher existiert eine große Nachfrage für diese Modelle. Bisher werden diese Höhenmodelle aus zwei oder mehreren Aufnahmen aus einem Orbit erstellt. Neuaufnahmen können sich durch verschiedene Einflüsse stark verzögern und sind weitaus kostenintensiver als Archivaufnahmen. Würde sich die Möglichkeit bieten, Archivaufnahmen zu verwenden oder wenige Neuaufnahmen durch Archivaufnahmen zu unterstützen, würde sich die Chance ergeben, das zur Verfügung stehende Budget so einzusetzen, dass eine höhere Redundanz an Aufnahmen geschaffen werden könnte. Somit könnte das resultierende Höhenmodell verbessert, bzw. seine Erstellung vergünstigt werden. Ein nicht zu vernachlässigender Vorteil wäre zudem die erhöhte Aufnahmewahrscheinlichkeit, welche eine geringere Anzahl von Neuaufnahmen aus einem Orbit mit sich bringen würde.

Die stetig wachsenden Archive der VHR-Satellitenprovider bieten eine Datenvielfalt, deren potentieller praktischer Nutzen für Höhenmodelle bisher noch nicht untersucht wurde.

1.2 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit soll sowohl eine erste Überprüfung des Potentials von across-track erzeugten Höhenmodellen bieten, als auch einen Leitfaden vorstellen, unter welchen Bedingungen across-track Aufnahmen für diese verwendet werden können.

Das Ziel des analytischen Teils der Arbeit ist eine Aussage über die Qualität von across-track erzeugten Höhenmodellen. Im theoretischen Teil sollen Veränderungen im Arbeitsablauf bei der Erzeugung von Höhenmodellen beschrieben werden, wenn Archivdaten verwendet werden können. Als Werkzeug soll dafür eine angepasste Form des Taskings beschrieben werden, welche die Verwendung von Archivdaten miteinschließt. Zusätzlich wird erläutert, wie Kosten auf Grund dieser Anpassungen gespart werden und die Aufnahmewahrscheinlichkeit erhöht werden kann. Dabei sollen Rahmenbedingungen für die Auswahl von Aufnahmen aufgezeigt werden.

Anpassung des Taskings

Auf Grund der Möglichkeit Archivdaten zu verwenden und diese mit Neuaufnahmen zu kombinieren, verändert sich der Arbeitsablauf des Taskings zur Erstellung von Höhenmodellen grundlegend. Bisher war es üblich, die Aufnahmen für die Erzeugung von Höhenmodellen aus einem Orbit aufzunehmen. Bei across-track erzeugten Höhenmodellen bietet sich jedoch die Möglichkeit an, eine oder mehrere der zu tätigen Aufnahmen durch Archivaufnahmen zu ersetzen. Dies bringt einige Anpassungen bei der Planung eines Taskings mit sich, die als Teilziel dieser Arbeit beschrieben werden sollen. Besonders bei der Kombination zeitlich variabler Aufnahmen entstehen folgende neue Fragen: Wie lange darf dieser Zeitraum sein? Von was hängt er ab? Wie wirkt er sich auf ein Höhenmodell aus? Des Weiteren soll ein

Vorschlag gemacht werden, wie eine Akquise von Aufnahmen unter minimiertem Kostenaufwand gestaltet werden kann.

Qualitätsaussage über across-track erzeugte Höhenmodelle

Damit across-track Aufnahmen für die Erstellung von Höhenmodellen verwendet werden können, um damit ein angepasstes Tasking umsetzen zu können, müssen Rahmenbedingungen gefunden werden, unter welchen eine solche Kombination möglich ist. Als Teilziel dieser Arbeit sollen also durch eine Untersuchung verschiedener Testgebiete diese Rahmenbedingungen formuliert werden. Dabei wird eine Aussage über die Einflüsse einzelner Features und Qualitätseinbußen getroffen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in zwei Hauptbereiche gegliedert: Einen theoretischen Teil (**Kapitel 2 – 5**) und einen analytischen Teil (**Kapitel 6**).

Im theoretischen Teil werden dabei technische und methodische Grundlagen (**Kapitel 1**) erläutert, welche die Voraussetzungen und Vorprozessierungsschritte beschreiben, die auf Satellitenbilder angewendet werden müssen, um diese für die Erstellung von Höhenmodellen verwendbar zu machen. Dabei soll das RPC Modell, welches die Transformation von Bildkoordinaten in Koordinaten der realen Welt ermöglicht, beschrieben werden. Der Aufbau und die Funktionsweise eines optischen hochauflösenden Satelliten unterscheidet sich vom verbreiteten Lochkameraprinzip, weswegen der Aufbau und die Funktion eines VHR Systems in diesem Kapitel erläutert werden. Es wird dazu aufgezeigt, auf welche Weise diese Satelliten Stereoszenen aufnehmen können, welche Winkel bei der Aufnahme eine Rolle spielen, und worin sich diese Systeme in ihrem Aufnahmeprinzip unterscheiden. Anschließend wird auf die Rekonstruktion von Tiefenwerten aus zwei Bildern eingegangen (**Kapitel 3**), und der theoretische Verlauf der Stereorekonstruktion vorgestellt. Im Teil „Spezielle Methoden und Maße“ soll der aktuelle Stand der Technik, verschiedene Ähnlichkeitsmaße zur Verwendung in Stereorekonstruktionsalgorithmen und die SGM-Technik erläutert werden. Im Kapitel „Taskingstrategien für Multitemporale Satellitendaten“ (**Kapitel 4**) wird das Potential der Archive moderner VHR-Systeme beschrieben. Zusätzlich wird vorgestellt, welche Möglichkeiten sich bieten, Archivdaten untereinander oder mit Neuaufnahmen zu kombinieren. Dazu werden Anhaltspunkte aufgezeigt, die es ermöglichen, ein Gebiet auf die zu erwartende Dynamik zu analysieren, um einen maximalen Zeitraum zwischen den Aufnahmen vor dem Erwerb der Satellitenszenen in Erfahrung zu bringen. Der Ablauf eines kostenreduzierten und optimierten Taskings bzw. einer Planung wird daraufhin in einem Leitfaden erläutert. Schließlich werden im Kapitel „Methoden zur Analyse und Prozessierung von Höhenmodellen“ (**Kapitel 5**) statistische und visuelle Analysemethoden beschrieben, welche für die Analyse der Testdaten verwendet werden. Des Weiteren wird dabei die Prozessierung der Testdaten beleuchtet. Zuletzt werden im Kapitel „Ergebnisse und Analyse“ (**Kapitel 6**) die Ergebnisse der Analysen der Testgebiete Madrid und Tripolis vorgestellt. In „Fazit und Ausblick“ (**Kapitel 7**) werden die erbrachten Ergebnisse eingeschätzt und eine Empfehlung für die Planung, Prozessierung und Postprozessierung von across-track erzeugten Höhenmodellen gegeben, sowie Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen aufgezeigt.

1.4 Literatur

Ähnliche Arbeiten

Die Überprüfung der Qualität across-track erzeugter optischer Höhenmodelle wurde bisher nur in wenigen Studien durchgeführt. AGUILAR ET AL. (2014) untersuchten im Februar 2014 in ihrem Paper „Generation and Quality assessment of Stereo-Extracted DSM from Geoeye-1 and Worldview-2 imagery“ unter anderem die Genauigkeit und Vollständigkeit across-track erzeugter Höhenmodelle. In den Untersuchungen kamen sie zum Ergebnis, dass die Genauigkeit der Höhenmodelle bei across-track erzeugten DSMs kaum schlechter ist als die der along-track erzeugten. ZHU ET AL. (2008) untersuchten in einer Studie, inwiefern die Genauigkeit von across-track erzeugten Höhenmodellen aus Einzelaufnahmen mit großen Zeitabständen sich verschlechtert. Sie kamen zum Ergebnis, dass die Genauigkeit kaum beeinflusst wird (ZHU ET AL., 2008). RAGGAM (2006) beschreibt in seiner Arbeit „Surface Mapping using Image Triplets: Case Studies and Benefit Assessment in Comparison to Stereo Image Processing“ unter anderem die Auswirkungen auf Dreifachstereokombinationen, wenn across-track Bilder in die Bildkomposition zur Rekonstruktion eines Höhenmodells einfließen. RAGGAM (2006) beobachtete dabei primär Auswirkungen auf die Vollständigkeit und die vertikale Genauigkeit.

In diesen Untersuchungen wurden allerdings keine Pixelweisen Matchingverfahren verwendet. Dies hat zur Folge, dass die Auflösung der resultierenden Höhenmodelle geringer ist, als die Auflösung der eingeflossenen Bilder. Somit lassen sich die Ergebnisse dieser Studien nur bedingt mit Untersuchungen vergleichen, in welchen eine Technik wie SGM eingesetzt wurde.

Computer Vision

SZELISKI (2011) stellt in seinem Werk „Computer Vision Algorithms and Applications“ die Grundlagen der Stereorekonstruktion vor. Bezüglich der Rekonstruktion der dreidimensionalen Information aus Stereobildern existieren zahlreiche Algorithmen. SCHARSTEIN & SZELISKI (2002) stellen dazu ein Klassifikationsschema für Algorithmen zur Stereorekonstruktion vor. Im Middlebury Stereo Benchmark¹ werden dazu zahlreiche Algorithmen mit Testdaten evaluiert. Da es sich bei den Testdaten dieses Benchmarks um terrestrische Daten handelt, welche nicht die typischen Effekte aufweisen, die reale Satellitendaten normalerweise besitzen, riefen REINARTZ ET AL. (2010) ein Stereobenchmark für Satellitendaten² ins Leben. In diesen Benchmarks zeigte die SGM Technik (HIRSCHMÜLLER, 2005, 2008; HIRSCHMÜLLER & BUCHER, 2010) gute Ergebnisse (D'ANGELO & REINARTZ, 2011). Da diese Technik insbesondere mit robusten Ähnlichkeitsmaßen, wie Census (ZABIH & WOODFILL, 1996), Hierarchical Mutual Information (HIRSCHMÜLLER, 2005, 2008; HIRSCHMÜLLER ET AL., 2012; HIRSCHMÜLLER & BUCHER, 2010) sowie Kombinationen aus beidem (ZHU ET AL., 2012), sehr gute Ergebnisse, besonders im Zusammenhang mit der Höhenrekonstruktion von Satellitenbildern zeigt, wird diese Technik zunehmend im photogrammetrischen Segment angewendet. Erste Studien (D'ANGELO & REINARTZ, 2011; HIRSCHMÜLLER ET AL., 2012) zeigen, dass SGM robuste und gute Ergebnisse bei der Rekonstruktion von Höheninformationen aus Satellitendaten erreichen kann. Das Verfahren wird mittlerweile auch in zahlreichen kommerziellen Systemen (WENZEL ET AL., 2013; CARL ET AL., 2013)

¹ <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval/> (Aufgerufen 21.2.2014)

² <http://www2.isprs.org/commissions/comm1/wg4/benchmark-test.html> (Aufgerufen 21.2.2014)

und für die vollautomatische Prozessierung großer Datenmengen aus Satellitendaten (D'ANGELO, 2010, KRAUB, 2013, HAALA, 2013), mit verschiedenen Modifikationen eingesetzt.

Methoden zu Analyse und Erstellung von Höhenmodellen

Für die Analyse von Gelände- und Oberflächenmodellen beschreiben REINARTZ ET AL. (2010) Analysemethoden für die Evaluation des ISPRS Stereo Benchmark. Dabei werden, wie auch in den Analysen von D'ANGELO & REINARTZ, (2011) und HOBI & GINZLER (2012), robuste Statistiken, sowie visuelle Analysetechniken für Oberflächenmodelle verwendet. Diese Methoden wurden in HÖHLE & HÖHLE (2009) erstmals für die Analyse von Höhenmodellen vorgestellt. PODOBNIKAR (2009) und BERRY (1987, 2007) stellen zusätzlich in Ihren Artikeln einige Analysemethoden für digitale Geländemodelle vor, welche jedoch teilweise auch für Oberflächenmodelle verwendet werden können. Die Technik und der Arbeitsablauf für die Erstellung von Höhenmodellen aus Satellitendaten mit SGM wird ausführlich in den Arbeiten von D'ANGELO (2010), GEHRKE (2010), HIRSCHMÜLLER ET AL. (2012) und WENZEL ET AL. (2013) beschrieben.

2 TECHNISCHE UND METHODISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel soll auf technische Grundlagen eingegangen werden, die eine Rekonstruktion von Höhendaten aus Satellitendaten voraussetzen. Dabei werden die Grundprinzipien und Voraussetzungen für die Tiefenrekonstruktion aus Stereobildern erläutert. Insbesondere wird auf VHR Satellitendaten, ihr Sensormodell und ihre Verarbeitung eingegangen. Es werden Winkel und geometrische Prinzipien vorgestellt, die bei der Stereoaufnahme auftreten.

2.1 Generierung digitaler Höhenmodelle

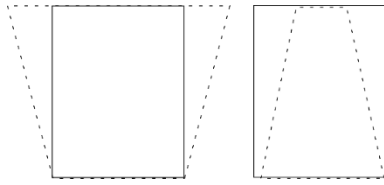
Vor der Rekonstruktion von Höhenmodellen aus optischen Daten ist es nötig, die Daten geometrisch zu korrigieren. Damit ähnliche Objekte möglichst schnell auf zwei Bildern gefunden werden können, sollten die Daten so korrigiert sein, dass korrespondierende Objekte bzw. Pixel leicht einander zugeordnet werden können. Die geometrischen Fehler, welche in den Bildern enthalten sind, können folgende Ursachen haben (erweitert nach RICHARDS, (2013)):

- Erdrotation
- Veränderungen der Höhe, Ausrichtung oder Geschwindigkeit des Aufnahmesystems
- Erdkrümmung
- Erdoberfläche (Relief)
- Atmosphäre (Refraktion, Turbulenzen)
- Ungenauigkeiten von Messinstrumenten des Satelliten

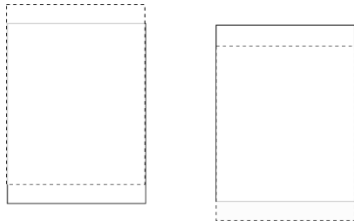
Da die aktuellen optischen VHR Satellitensysteme alle nach der Push-Broom Methode³ funktionieren, tritt eine Verschiebung jeder Bildzeile in Abhängigkeit der Orbit-Inklination des Satelliten auf.

Die Veränderung der Bewegung des Satelliten ist in folgender erweiterten Abbildung nach RICHARDS (2013) passend dargestellt. Dabei ist der Maßstab der Veränderung des Bildes stark übertrieben, da sonst kaum Veränderungen sichtbar wären.

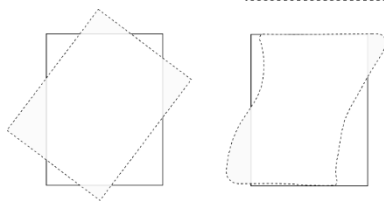
³ Eine Sensorzeile nimmt in regelmäßigen kurzen Abständen auf (die Sensorzeile ist dabei quer zur Flugrichtung angeordnet) und wird durch die Bewegung in Flugrichtung des Satellitensystems selbst verschoben.



Veränderung der Höhe des
Aufnahmesystems während der Aufnahme



Pitch-veränderung oder Veränderung der
Fluggeschwindigkeit (Neigung in
Flugrichtung, bewirkt zusätzlich einen
ähnlichen Effekt wie bei der Veränderung
der Höhe)



Links: Yaw-Veränderung (Drehbewegung)
Rechts: Roll-Veränderung (Kippbewegung
seitlich zur Flugrichtung)

Abbildung 1: *Verschiedene Arten der Verzerrung
Verzerrungen auf Grund einer Veränderung der Ausrichtung des Satellitensystems,
verändert nach RICHARDS (2013)*

Bewegungen des Satellitensystems

Bei Satelliten kommen signifikante Geschwindigkeitsveränderungen nur selten vor. Da der Orbit von Satelliten in regelmäßigen Abständen korrigiert werden muss, wird dazu für eine Erhöhung des Orbits das System beschleunigt, und für eine Senkung abgebremst. Dadurch gewinnt bzw. verliert das System an Winkelgeschwindigkeit, und die Zentripetalkraft wird je nach Aktion schwächer oder stärker, was in einer Höhenveränderung resultiert (REES, 2013). Eine Veränderung der Höhe des Aufnahmesystems bezogen auf die Erdoberfläche kommt oft vor, da die Erde in fast allen Bereichen von einem Ellipsoid abweicht. Yaw-, Pitch- und Roll-Bewegungen können durch die meisten VHR-Systeme ebenfalls durchgeführt werden.

Auswirkungen der Bewegungen

JACEK GRODECKI und GENE DIAL (2003) beschreiben in ihrem Paper „Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images described by rational Polynomials“, wie stark sich Einflüsse von Messfehlern, beispielsweise bei der Ausrichtung oder der Position des Satelliten Ikonos, auf die Verschiebung in den Bildzeilen/Reihen bzw. (in metrischen Einheiten) auf dem Boden auswirken. Dabei ist der Lageversatz, welcher durch Fehlmessungen von Roll- oder Pitch- Bewegungen hervorgerufen wird (bei Ikonos liegt er bei einem Winkelfehler von 2“ etwa 6,6 m), weitaus größer als der bei Yaw-bewegungen (2 Winkelsekunden etwa 0,05 m) (GRODECKI & DIAL, 2003).

Effekte durch die Erdoberfläche

Die Erdkrümmung wirkt sich nur minimal auf die Abbildungsgeometrie von VHR Systemen aus – die Szenengröße ist auf einen verhältnismäßig kleinen Bereich beschränkt, wodurch die Erdkrümmung kaum Einfluss auf die Geometrie einer VHR Szene hat. Die Erdrotation dagegen bewirkt einen sogenannten Skew, bei dem einzelne Bildzeilen in Richtung der Erdrotation verschoben werden.

Die Erdoberfläche kann durch topographische Abweichungen von einem Referenzellipsoid abweichen. Bestes Beispiel dafür sind Gebirge. In kleinen Skalen auch Gebäude oder andere Features. Diese Faktoren beeinflussen die Pixelauflösung der betroffenen Pixel einer aufgenommenen Bildzeile. Zwar ist die Änderung auf Grund der großen Flughöhe des Satelliten nicht groß, beeinflusst aber dennoch die Geometrie des resultierenden Bildes. Zum Ausgleich von „Umklapp“-Effekten bzw. Verzerrungen wird ein Digitales Oberflächenmodell benötigt – Nach einer Entzerrung (Rektifizierung) mit einem passenden Oberflächenmodell ist die Aufnahme dann ein sog. Orthophoto.

Effekte durch die Aufnahmewinkel

Tätigt ein Satellit aus einer geschwenkten Position Aufnahmen, was gerade bei der Aufnahme von Mehrfachstereoaufnahmen essentiell ist, verändert sich durch die verschiedenen Abstände der Objekte zum Sensor auch die Pixelgröße und damit auch die Geometrie. Zwar ist dies bei VHR-Systemen durch die schmalen Aufnahmestreifen nicht sehr ausschlaggebend, aber dennoch in extremeren Winkeln bedeutsam.

2.1.1 Höhenmodelle aus optischen Daten

Menschliche Tiefenwahrnehmung

Für die Erzeugung eines Höhenmodells aus optischen Daten werden mindestens zwei optische Abbilder eines Gebiets benötigt. Die Erzeugung von Höhenmodellen bzw. Tiefenbildern lässt sich gut mit der menschlichen Tiefenwahrnehmung vergleichen, weshalb diese im Folgenden parallel zur menschlichen Wahrnehmung erläutert wird. Für die Messung der Entfernung eines Gegenstandes im menschlichen Sichtfeld gibt es verschiedene Möglichkeiten. Dazu zählt beispielsweise die Fähigkeit des Gehirns, Gegenstände zu erkennen und festzustellen, welcher davon im Vordergrund und welcher im Hintergrund ist. Ebenso wird ein größer erscheinendes Objekt ohne Relation oder partielle Verdeckung als nah wahrgenommen. Für diese Fähigkeiten ist allerdings nur eine zweidimensionale Abbildung notwendig, sie kann deshalb auch mit einem Auge ausgeführt werden. Sie zählt zu den sog. bildhaften Hinweisreizen (RÖSLER, 2011). Neben dieser Fähigkeit existiert die sog. binokulare Disparität, für die zwei Bilder aus jeweils verschiedenen Perspektiven benötigt werden. Dafür werden beide Augen gebraucht. Im Prozess der Wahrnehmung überlagert das Gehirn, vereinfacht gesehen, die jeweils planaren Bilder der Augen und berechnet an Hand der Verschiebung von Gegenständen in den einzelnen Bildern ihre Entfernung. Das ist nur möglich da die Augen einen Abstand zueinander haben und sich somit eine geometrische Relation ergibt.

Tiefenrekonstruktion aus Satellitenbilddaten

Analog funktioniert die Erstellung von Höhenmodellen aus optischen Satellitenbilddaten. Optische Fernerkundungssatelliten nehmen zwei oder mehr Bilder aus verschiedenen Perspektiven auf, wobei die Entfernung der beiden Aufnahmepunkte ungefähr bekannt ist. Die Entfernung ist vergleichbar mit dem Abstand der Augen zueinander und wird Basislinie genannt. Die Berechnung der Abstände gleicher Objekte und deren Suche auf den planaren Bildern werden im sog. Matching durchgeführt. Der Prozess des Matching geschieht in der menschlichen Wahrnehmung nahezu verzögerungsfrei, da das Gehirn sehr schnell korrespondierende Objekte aus den Bildern der beiden Augen überlagert und ihre Entfernung feststellen kann. Der Hauptunterschied der Aufnahme optischer VHR-Satellitendaten zum verbreiteten Lochkameramodell, auf welchem auch die menschliche Sicht basiert, besteht darin, dass optische Satellitendaten jeweils einzelne Zeilen in kurzen Abständen aufnehmen. Aus diesem Grund benötigt man anders als im Lochkameramodell für jede dieser Bildzeilen eine mathematisch formulierte Abbildung, um die Transformation vom Bildraum in den Objektraum durchführen zu können.

Das Korrespondenzproblem

Bei der Erstellung von Höhenmodellen aus optischen Satellitendaten ist die Feststellung, welcher Bildpunkt einem Bildpunkt im jeweils anderen Bild entspricht eine rechenintensive Aufgabe, da für möglichst viele einzelne Bereiche im Bild A, möglichst ähnliche Bereiche in Bild B gefunden werden müssen. Dieses Problem wird auch Korrespondenzproblem genannt. Für diesen Suchprozess nach korrespondierenden Bereichen oder Pixeln (Matchingprozess) können zahlreiche Algorithmen und Methoden verwendet werden, welche unterschiedliche Vor- und Nachteile bezüglich der benötigten Rechenzeit, der Genauigkeit oder der Vollständigkeit des resultierenden Modells zeigen. Das resultierende Modell wird Disparitätsbild genannt. Aus diesem kann durch geometrische Beziehungen innerhalb der Aufnahmegeometrie ein Höhenmodell errechnet werden. Der Prozess des Matching wird im Kapitel „Grundlagen der Stereo Vision“ genauer erläutert. Innerhalb des Bereichs der optischen Fernerkundung gibt es verschiedene Systeme, die Einzelbilder auf verschiedene Art und Weise aufnehmen können. Darauf soll im folgenden Kapitel „Aufbau eines stereofähigen Satellitensystems“ eingegangen werden.

Aufnahmezeitpunkt und Perspektive

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, wie Satellitensysteme Einzelbilder aus verschiedenen Perspektiven und zu verschiedenen Zeiten aufnehmen können und wie diese geometrisch dargestellt werden können. Bei der Aufnahme von Stereobildern unterscheidet man zwischen along- und across-track Stereoaufnahmen. Along-track bedeutet bei der Aufnahme von Stereobildern, dass der Satellit eine Schwenkbewegung in Flugrichtung durchführt, um dasselbe Gebiet mehrmals abzubilden. Dabei erfolgen die Aufnahmen nacheinander in kurzen Zeitabständen. Across-track Stereoaufnahmen hingegen können aus zwei verschiedenen Orbits bzw. Überflügen aufgenommen werden – was zwangsläufig einen minimalen Zeitabstand der einzelnen Aufnahmen in der Länge der Revisit-Time (Zeitspanne, nach der der Satellit ein Ziel erneut aufnehmen kann) mit sich bringt. Sie erfordern eine Schwenkbewegung entgegen der Flugrichtung, da sich die orbitalen Flugbahnen in diesem Fall nicht exakt gleichen.

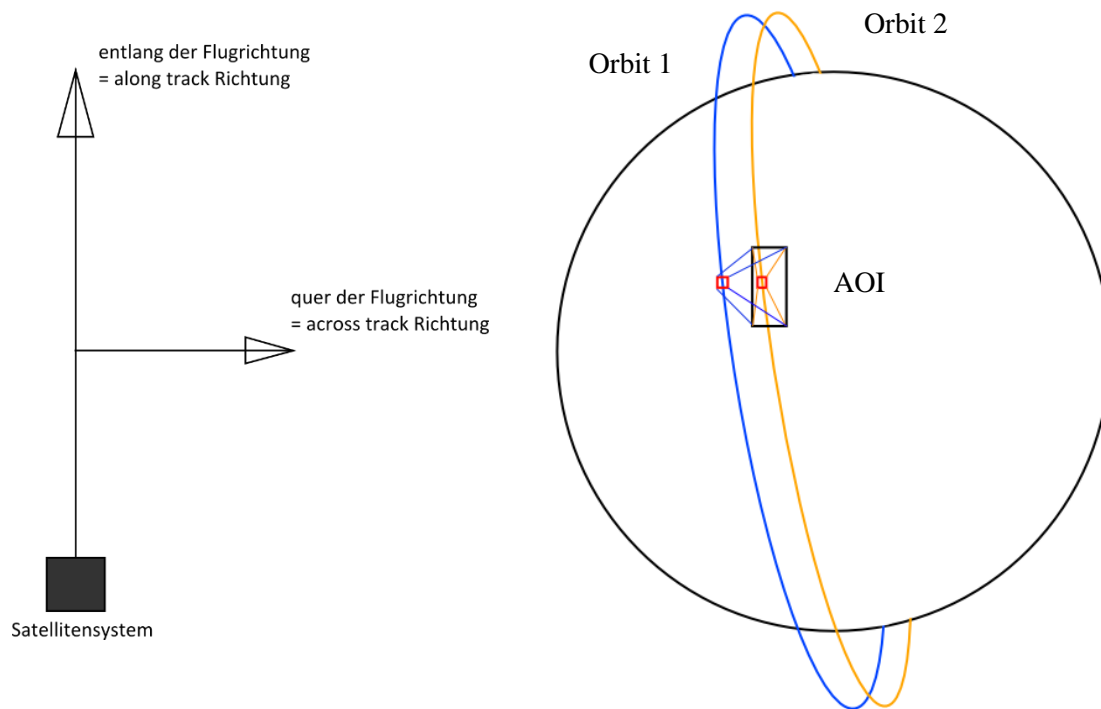


Abbildung 2: Unterschied von along- und across track
links: along- und across track Richtungen,
rechts: Aufnahme einer AOI aus zwei verschiedenen Orbits (across track)

Aufnahmen bzw. Aufnahmekombinationen lassen sich besonders gut mit Hilfe eines sogenannten Skyplots oder Rose Plots darstellen (HANEBERG, 2004; GRODECKI 2001). Durch die Darstellung können besonders Blickrichtungen bzw. die Ausrichtung von Satelliten auf die Area of interest (AOI) sowie ihr Orbit zum Zeitpunkt der Aufnahme dargestellt werden. Die Aufnahmerichtung, aus der Szenen aufgenommen werden, kann sehr gut mit dem verbreiteten „Azimut Elevation Modell“ beschrieben werden. Im „Azimut Elevation Modell“ benennt der Azimut die horizontale Blickrichtung und die Elevation die vertikale Abweichung von einer waagrechten Ebene. Beide Maße werden üblicherweise in Dezimalgrad angegeben. Bezieht man das Azimut-Elevation-Modell auf eine Satellitenbildaufnahme, geht man im Normalfall für die Darstellung von Aufnahmepositionen von der Sichtweise einer Satellitenszene als Zentrum aus. Somit bewegen sich die Elevation-Winkel immer im positiven Bereich. Da die Azimut- und Elevationswinkel aus den Metadaten der Aufnahmen in den Archiven entnommen werden können, lassen sich die Skyplots als gutes Werkzeug für die Planung verwenden.

Da die Aufnahme durch Zeilenscanner je nach Länge des Aufnahmestreifens eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, verändern sich während der Aufnahme auch die Aufnahmewinkel, da der Satellit während der Aufnahme nur schlecht eine Bewegung durchführen kann. Aus diesem Grund ist in den Metadaten ein Maximal, Minimal und Mittelwert für die Aufnahmewinkel angegeben.

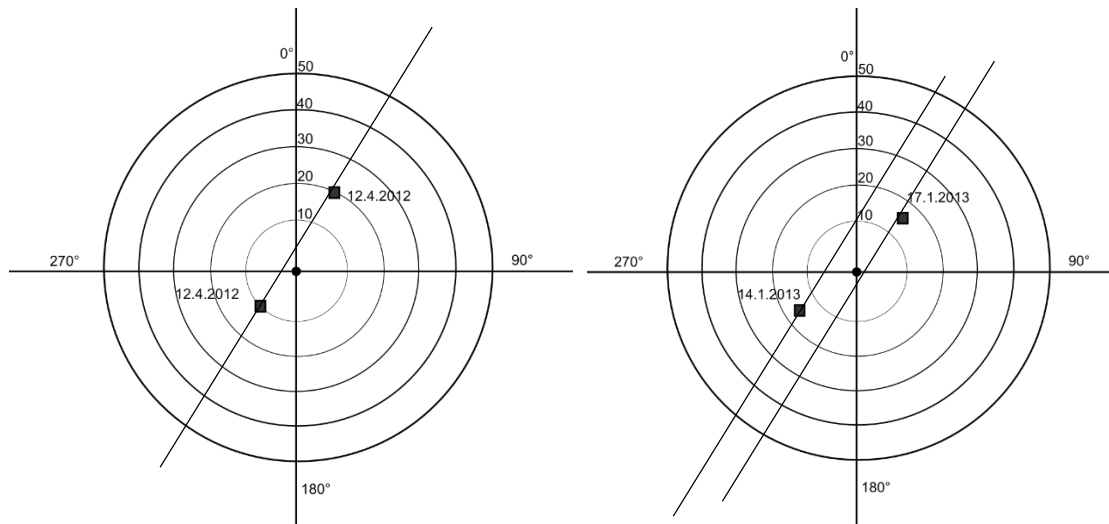


Abbildung 3: Skyplot Darstellung
 Links: Skyplot einer along-track Stereoaufnahme
 Rechts: Skyplot einer across-track Stereoaufnahme

Im ersten Skyplot in Abbildung 3 sind zwei Aufnahmen (schwarz, quadratisch dargestellt) aus einem Orbit vom 12.4.2012 über dem Ziel (mittig) zu sehen. Die Daten sind fiktiv und dienen nur der Erläuterung der Skyplot-Darstellung. Dabei besitzt der Satellit in der ersten Position (südlich im linken Plot) einen Blickwinkel von etwa 205° (Azimut) und einen Off-Nadir Winkel von etwa 10° (Elevation). Die Orbitalen Flugbahnen sind beispielhaft als schwarze Linien eingezeichnet. An der zweiten Position, an welcher sich der Satellit kurz nach der ersten Position befindet, blickt der Satellit von etwa 25° mit einem Off-Nadirwinkel von etwa 20° auf das Ziel. Vereinfacht kann man den Bewegungsablauf des Satelliten folgendermaßen beschreiben: Der Satellit schaut in Flugrichtung schräg nach vorn auf das Ziel, nimmt auf, schwenkt und sieht anschließend nach dem Überflug schräg auf das Ziel zurück, um es erneut aufzunehmen. Im zweiten Skyplot wurden zwei Bilder aus verschiedenen Orbits mit einem zeitlichen Abstand von drei Tagen aufgenommen.

2.1.2 Effekte bei der Erstellung von Höhenmodellen aus optischen Daten

Bei der Erstellung von Höhenmodellen aus zwei oder mehreren Einzelbildern können einige typische Effekte auftreten. Diese Effekte treten auf Grund der Daten bzw. des Aufnahmesystems selbst, auf Grund der Aufnahmewinkel des Aufnahmesystems oder wegen dem Zeitabstand der verwendeten Einzelbilder auf.

Verdeckungen

Verdeckungen entstehen durch fehlende Korrespondenzen von Objekten bzw. Pixeln in den Eingangsbildern, welche durch andere Objekte verdeckt werden. Um einen Höhenwert zu rekonstruieren muss in mindestens zwei Bildern ein korrespondierendes Objekt bzw. ein korrespondierender Pixel gefunden werden. Wird jedoch auf Grund der Aufnahmewinkel ein Objekt von einem anderen Objekt verdeckt, kann keine Korrespondenz zwischen den Objekten festgestellt werden und der betroffene Bereich kann nicht rekonstruiert werden. In Abbildung 9 wird eine Verdeckung in einer Skizze erläutert. In der Praxis werden solche Bereiche für die bessere Handhabung und Ansicht interpoliert oder durch andere Höhendaten ersetzt. Sehr verbreitet ist dabei unter anderem die sog. „Delta-Surface-Fill“ Methode (GROHMAN ET AL., 2006), bei der ein bereits vorhandenes DSM

durch Angleichung der Randbereiche und durch eine durch eine eventuelle Absenkung bzw. Anhebung in die fehlenden Bereiche (Voidbereiche) des DSM gefüllt wird. Gerade für große Voidbereiche eignet sich diese Methode gut, da dadurch ein Mehrwert an Information im Gegensatz zu einer kompletten Interpolation im DSM vorhanden ist. Als sog. Füllpartner eignen sich auch Höhenmodelle anderer Auflösungsstufen, wie zum Beispiel das SRTM Höhenmodell, das fast weltweit frei verfügbar ist.

Veränderung von Objekten zwischen den Aufnahmen

Sowohl bei along-track als auch bei across-track erzeugten Höhenmodellen kann es vorkommen, dass sich Objekte zwischen den Aufnahmen verändern. Dies ist bei along-track Aufnahmen seltener der Fall, da sich dort nur wenige Sekunden zwischen den Aufnahmen befinden. Bei einer Kombination aus across-track Aufnahmen kann jedoch so viel Zeit vergehen, dass sich sowohl anthropogen erschaffene Objekte als auch natürliche Objekte stark verändern. Beispiele für dynamische anthropogen erschaffene Objekte sind Baustellen, Parkplätze und Staudämme. Natürliche Objekte können sich durch wechselnde Jahreszeiten, Bodenbedeckung, Stürme oder Fluten stark verändern. In Abbildung 4 sind Ausschnitte von zwei Aufnahmen vom 29. September 2011 und 4. September 2013 des Satelliten Worldview-2 abgebildet. Die Ausschnitte bilden ein Gebiet nahe Innsbruck ab. Deutlich zu erkennen ist, dass in beiden Ausschnitten, welche zwei Jahre auseinanderliegen, unterschiedliche Feldfrüchte angebaut wurden und die Feldoberfläche deutliche Unterschiede auf Grund der Bearbeitung aufweist. Ein Matching der Bilder wäre aus diesem Grund auf den Feldern nicht erfolgreich, da dort wenige oder keine korrespondierenden Punkte gefunden werden könnten.



Abbildung 4: Orthobilder mit zwei Jahren Abstand
Links: Aufnahme von 2011
Rechts: Aufnahme von 2013

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Artefakte durch bewegte, transparente oder spiegelnde Objekte in Höhenmodellen

Betrachtet man hochauflösende along-track Höhenmodelle, treten auf Verkehrswegen viele Artefakte auf. Diese Artefakte sind im Höhenmodell durch wannen- und pockenähnliche Strukturen auf den Straßen erkennbar. Sie entstehen durch langsam fahrende Fahrzeuge, welche sich zwischen den

Aufnahmen um eine bestimmte Entfernung bewegt haben. Da in der Korrespondenzsuche dasselbe Objekt um einige Meter versetzt in der nächsten Aufnahme erkannt wird, wird es als korrespondierend festgelegt und äußert sich anschließend im Höhenmodell durch eine fehlerhafte Abbildung. Abbildung 5 zeigt eine Straße mit Artefakten aus einem eingefärbten Höhenmodell in Schrägansicht, welches aus drei along-track Aufnahmen entstanden ist. CARL ET AL. (2013) schlagen vor, Artefakte, die durch bewegte Objekte entstanden sind, durch eine manuelle Editierung zu maskieren und zu interpolieren. Ein ähnlicher, aber schwererwiegender Effekt entsteht beim Versuch, korrespondierende Punkte auf Wasseroberflächen zu finden. Die hohe Dynamik eines Gewässers, die unterschiedliche Transparenz, die Abhängigkeit der Reflektion vom Sonnenstand und vom Aufnahmewinkel sowie andere optische Effekte auf der Oberfläche verursachen diese Probleme. In der praktischen Anwendung werden solche fehlenden Oberflächen oft durch die niedrigsten umgebenen Höhenwerte der Uferbereiche oder durch einen manuellen Editierungsschritt mit einer Höhe versehen, um ästhetisch bzw. sogar hydrologisch korrigierte Wasserflächen zu erzeugen. Dieser Schritt wird oft als hydro-conditioning beschrieben, und ist nicht mit dem hydro-Enforcement zu verwechseln, welches das gesamte Höhenmodell verändert und dabei einen korrekten Abfluss von jeder Rasterzelle zu den Kanten des Höhenmodells erzwingt (MOUNT ET AL., 2008).

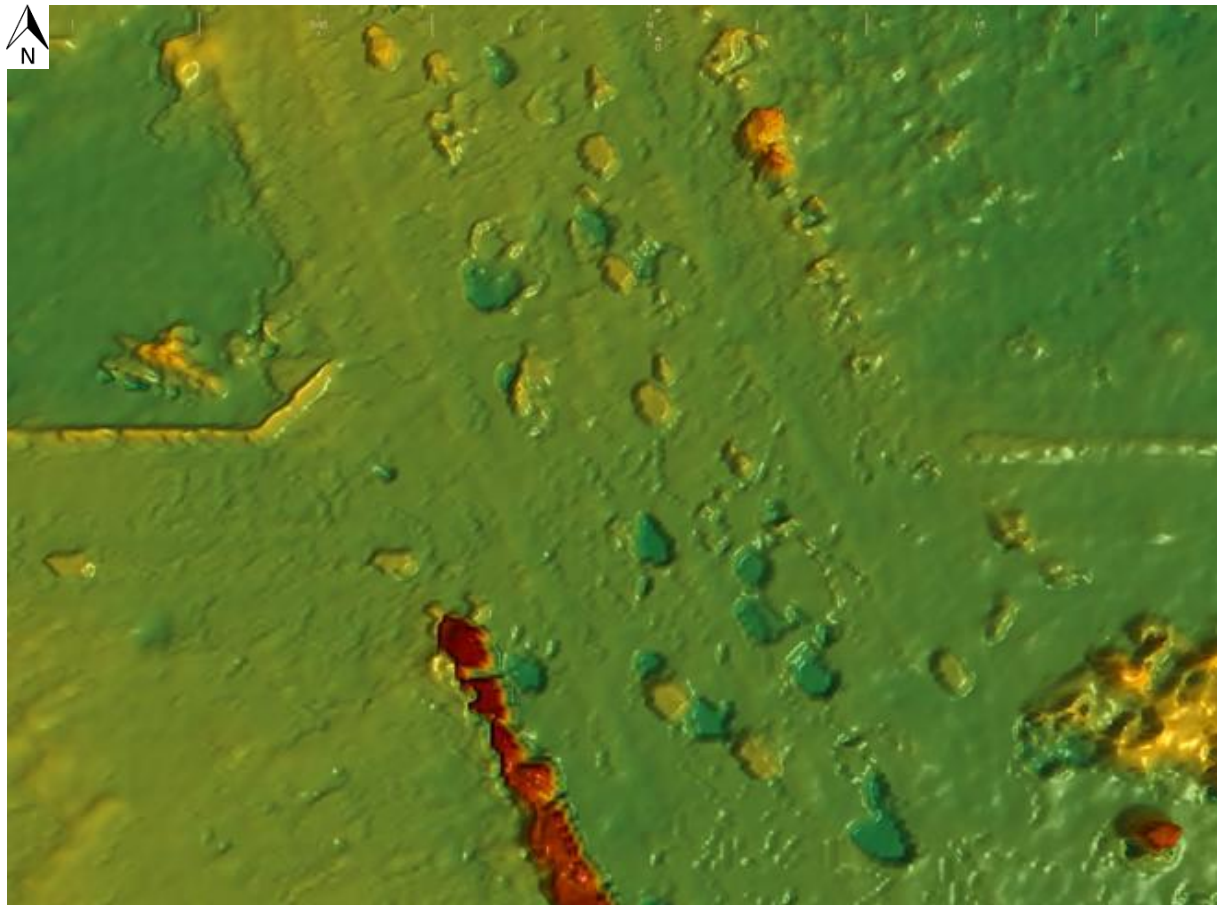


Abbildung 5: Artefakte auf Verkehrswegen
Abbildung aus CARL ET AL, 2013
Kontinuierliche Einfärbung

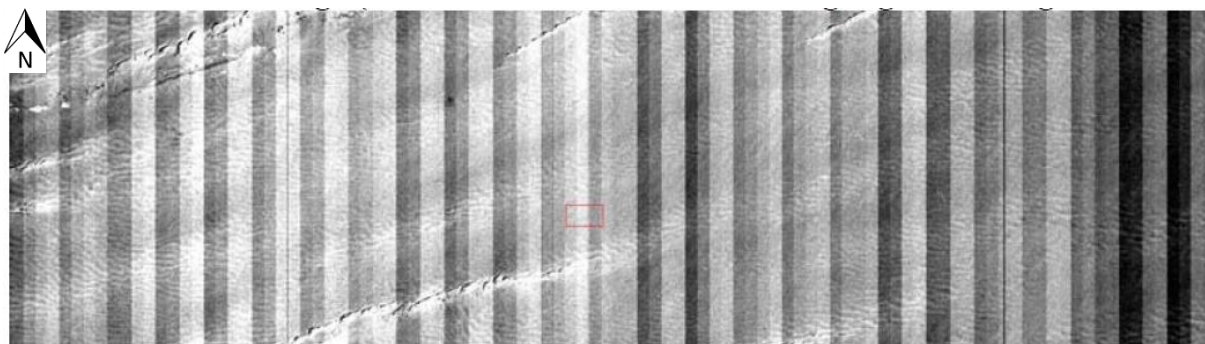
Texturarme Gebiete

Textur in Satellitenbildern resultiert aus den Oberflächenstrukturen der Erdoberfläche. Dabei kann eine Oberflächenstruktur auch als eine Zusammensetzung einer Oberfläche aus verschiedenen Materialien gesehen werden. Die Größe der Einzelelemente, die eine Oberfläche ergeben, spielt dabei eine große Rolle. Geht man von einer völlig planen Oberfläche aus, welche sich aus Einzelobjekten ergibt, die größer sind als die Ground sampling Distance (GSD) eines Sensors, sind diese Elemente als einzelnes erkennbar und geben der Oberfläche eine Struktur. Sind diese Elemente jedoch sehr viel kleiner als die GSD eines Sensors, spielt deren spektrale Signatur kaum mehr in die Zusammensetzung eines Pixels mit ein, und die Oberfläche erscheint ohne Struktur. Texturarme Gebiete treten primär in ariden Gebieten, insbesondere Sandwüsten auf. Ebenso können schneebedeckte Bereiche sehr wenige Texturen aufweisen. Durch diese Armut an Texturen kann es unmöglich sein, in solchen Gebieten korrespondierende Objekte oder Pixel zu finden, da sich dort die Bildbereiche durch ihre Gleichförmigkeit nicht unterscheiden bzw. vergleichen lassen. Die Folge daraus sind Voidbereiche in diesen Gebieten. Um diese Bereiche trotzdem mit einer Höheninformation zu versehen, wird wie beim Punkt „Verdeckungen“ vorgegangen, und beispielsweise ein Höhenmodell aus Radar- oder Lidardaten für diesen Bereich verwendet, da diese Techniken auf homogenen Oberflächen gute Ergebnisse erreichen.

Effekte durch sensorbedingte Einflüsse

Optische VHR-Sensoren nach dem Push-Broom Prinzip neigen dazu, beim Auslesen der einzelnen CCD-Sensoren bzw. beim Auslesen der Schieberegister, die eine gewisse Anzahl von CCD-Sensoren auslesen, radiometrische Änderungen zwischen diesen Elementen aufzunehmen. Diese Änderungen sind abhängig vom Sensor bzw. der Sensorplattform.

Diese radiometrischen Effekte werden zwar während der Prozessierung des Satellitenproviders zur Produkterstellung so gut wie möglich entfernt, äußern sich aber dennoch in den Produkten als senkrechte Linien. Sie werden oft als „Banding-“ bzw. „Streaking-“ Effekte beschrieben.



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Abbildung 6: Radiometrische Effekte
Sensorbedingte radiometrische Effekte des Satelliten Worldview-2
Grafik aus "Radiometric use of Worldview 2 Imagery"⁴
stark gestrecktes, radiometrisch unkorrigiertes Bild, zur besseren Erkennung der Effekte

⁴ Digital Globe Internetseite, [http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Radiometric_Use_of_Worldview-2_Imagery%20\(1\).pdf](http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Radiometric_Use_of_Worldview-2_Imagery%20(1).pdf) (Augerufen 27.3.2014)

Diese Effekte sind zwar nur schwer auf den ungestreckten Daten zu erkennen, haben aber dennoch durch ihre minimalen Unterschiede geringe Auswirkungen auf die Höhenmodelle, wie im Ausschnitt in Abbildung 7 zu sehen ist.

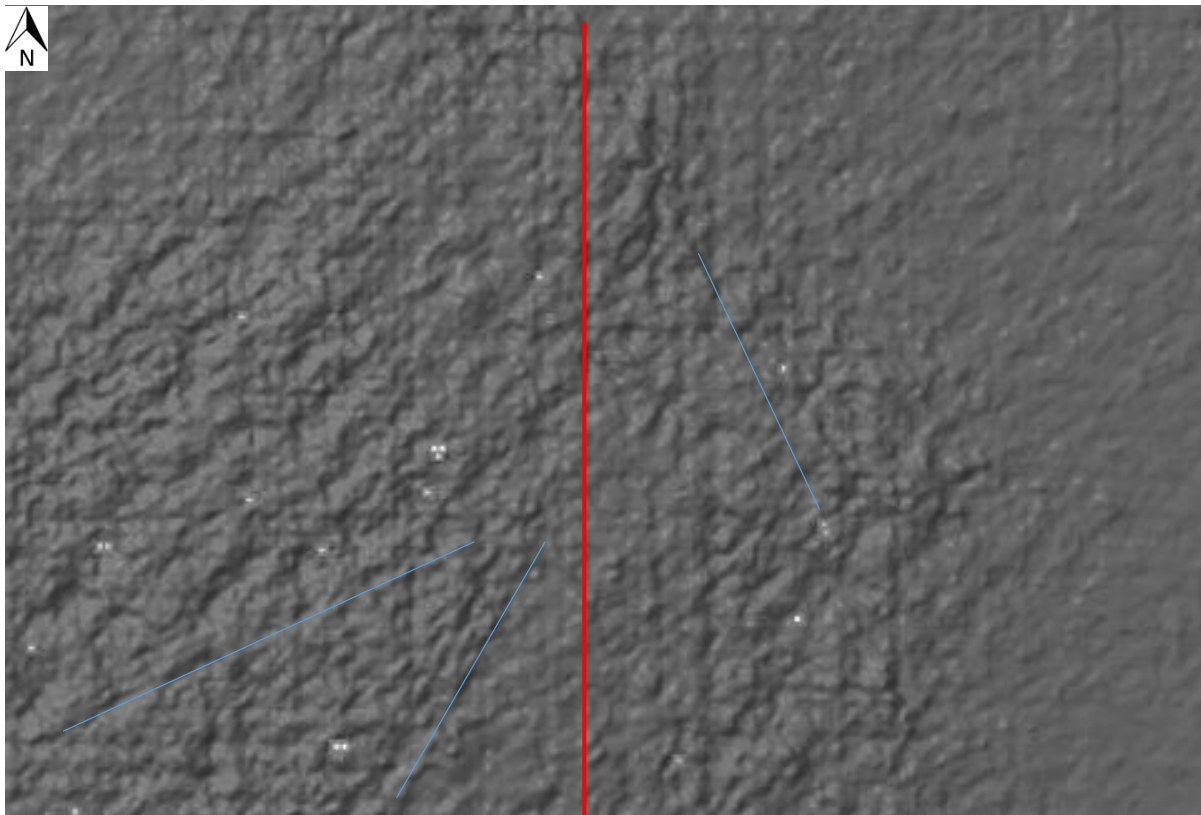


Abbildung 7: Auswirkungen radiometrischer und matching bedingter Effekte auf das Höhenmodell
 Schummerung eines in-track erzeugten Oberflächenmodells.
 Rot: Effekte durch Streaking (als senkrechte Linien erkennbar)
 Blau: Effekte durch SGM-Technik (als diagonale Linien erkennbar)

Effekte, bedingt durch den Matching-Vorgang

In Abbildung 7 sind in blauer Farbe auch lineare Effekte markiert, die sich diagonal in den Bildern bewegen. Diese Effekte sind durch die Prozessierung des semi-global Matching entstanden und treten in besonders flachen und homogenen, sowie texturarmen Bereichen auf. Da im semi-global Matching Algorithmus (Semi-global Matching, 3.2.2) 16 Pfade aus verschiedenen Richtungen aggregiert werden, kommt es in texturarmen Gebieten dazu, dass diese Pfade im DSM oft sichtbar werden. Algorithmen, welche ihre Kosten nur entlang eines Pfades berechnen und aggregieren, äußern sich durch weitaus stärkere Effekte (Stereorekonstruktion, 3.1.2).

2.1.3 Aufbau und Funktion eines stereofähigen Satellitensystems

Die Aufnahmemethode eines stereofähigen Satellitensystems ist abhängig von dessen Aufbau. Satellitensysteme werden immer auf Grundlage benötigter Endprodukte oder Anwendungszwecke entworfen. So gibt es Systeme, die für ein breites Spektrum an Anwendungen geplant werden, oder solche, die für einige wenige spezielle Anwendungszwecke entworfen werden. Ein gutes Beispiel dafür

sind die Satelliten Worldview-2⁵ und Cartosat-1 (CARTOSAT-1 DATA USER'S HANDBOOK), auf deren Eigenschaften in den folgenden Erläuterungen mehrmals zurückgegriffen wird.

Die Sensoren befinden sich innerhalb der Satelliten auf einer thermal und mechanisch stabilen Plattform. Sie wurden bereits auf der Erde zahlreichen Kalibrierungen mit Hilfe von Kalibrierungsmustern unterzogen. Die innere Orientierung der Sensoren von VHR Satelliten ist aus diesem Grund gut vermessen und ihre Fehler konnten ausreichend gut mathematisch modelliert werden. Die äußere Orientierung (ihre Position im Weltkoordinatensystem) der Satellitensysteme wird durch Sensoren bestimmt, welche die Position der Sterne beobachten. Ebenso werden die Ephemeriden, also die Positionen der Satelliten zu einer bestimmten Zeit, durch den Empfang von GPS-Signalen festgehalten. Die äußere Orientierung ist abhängig von der Ausrichtung und der Position des Systems (GRODECKI & DIAL, 2003), wie bereits zu Beginn des Kapitels erläutert. Aus Geheimhaltungsgründen liefern die meisten Satellitenprovider für optische VHR-Daten nicht die exakte innere und äußere Orientierung als Sensormodell (SINGH, 2008).

Das RPC Modell

Stattdessen wird bei einer Datenbestellung eine sogenannte „RPC“ (rational polynomial coefficients) Datei mitgeliefert (NGA, 2011). Sie enthält Koeffizienten für sogenannte RFMs (Rational Function models), welche eine Beziehung eines Punktes (row(r), column(c)) im zweidimensionalen Bild mit einem Punkt in der dreidimensionalen Welt (Latitude(φ), Longitude(λ), Height(h)) herstellen können. Das RFM kann die Beziehung zwischen Welt und Bild, wie sie in einem Sensormodell beschrieben werden kann, nur approximieren. Dazu werden insgesamt vier mal 20 normalisierte Koeffizienten (Koeffizientensets mit je 20 Koeffizienten: *Line_Num_Coef*, *Line_Den_Coef*, *Samp_Num_Coef* und *Samp_Den_Coef*) für zwei Transformationsfunktionen mitgeliefert. Diese bestehen jeweils aus einem Bruch aus zwei kubischen Polynomen, deren einzelne Glieder mit den normalisierten einzeln zugeordneten Koeffizienten multipliziert werden:

$$r_n = \frac{\sum_{i=1}^{20} \text{Line_Num_Coef}_i * \rho(\varphi, \lambda, h)}{\sum_{i=1}^{20} \text{Line_Den_Coef}_i * \rho(\varphi, \lambda, h)}, c_n = \frac{\sum_{i=1}^{20} \text{Samp_Num_Coef}_i * \rho(\varphi, \lambda, h)}{\sum_{i=1}^{20} \text{Samp_Den_Coef}_i * \rho(\varphi, \lambda, h)} \quad (1)$$

Die Einzelglieder der kubischen Funktion sind in einer bestimmten Reihenfolge geordnet, wie im NITF Standard, Appendix E der NGA (2011) nachgesehen werden kann. Vereinfacht kann nach FRASER & HANLEY (2005) sowie nach GRODECKI UND DIAL (2003) das Modell wie folgt beschrieben werden (Notation angepasst):

$$\begin{aligned} r_n &= \frac{F_1(\varphi, \lambda, h)}{F_2(\varphi, \lambda, h)} \\ c_n &= \frac{F_3(\varphi, \lambda, h)}{F_4(\varphi, \lambda, h)} \end{aligned} \quad (2)$$

Wobei F_1, \dots, F_4 die Polynome dritten Grades darstellen (deren Parameter wiederum durch Faktoren, die ebenso in den Dateien zum RPC-Modell mitgeliefert werden, skaliert werden), die jeweils 20 zugehörige

⁵ Worldview-2 Produktdatenblatt

http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG_WorldView2_DS_PROD.pdf (Aufgerufen 23.1.2014)

Koeffizienten aufnehmen. Die planimetrischen Koordinaten des abgebildeten Gebiets können durch die rationalen Funktionen der Bildkoordinaten und der Höhe mit denselben Koeffizienten errechnet werden:

$$\varphi = \frac{F_1(r, c, h)}{F_2(r, c, h)}$$

$$\lambda = \frac{F_3(r, c, h)}{F_4(r, c, h)}$$

Die Koordinaten φ, λ liegen jeweils in Grad, mit Bezug auf das WGS84 Koordinatensystem, vor.

Die RPC Koeffizienten werden hinsichtlich einer Referenzhöhe aus dem geometrischen Sensormodell mit Hilfe von regelmäßig verteilten Passpunkten, durch Methoden der Ausgleichsrechnung (DIAL & GRODECKI, 2002; GRODECKI & DIAL, 2003), bestimmt. Jedes Bild besitzt damit unterschiedliche RPC Koeffizienten. (MÜLLER, 2008)

Genauigkeitsverbesserung im RPC Modell

Da die Messungen durch Sternensensoren und GPS keine verlässliche Lage bzw. Ausrichtung der Satelliten bereitstellen, zeigen FRASER & HANLEY (2005) und insbesondere DIAL & GRODECKI (2002) in ihren Arbeiten die Möglichkeit, durch eine Transformation die Fehler in einem RPC Modell zu minimieren. Diese Fehler können durch Affintransformationen oder Transformationen höheren Grades modelliert bzw. ausgeglichen werden. DIAL & GRODECKI (2002) stellen in ihrer Arbeit eine Technik vor, welche es ermöglicht, einen Bündelblockausgleich (Bundle block adjustment) mit RPCs bzw. angepassten RPCs durchzuführen.

Bundle block adjustment

Um die Position der einzelnen Bilder untereinander und absolut zu verbessern, wird versucht, den sogenannten Projektionsfehler (Reprojection Error) zu minimieren. Der Reprojection Error kann durch ausreichend viele korrespondierende Bildpunkte, welche in allen Bildern durch eine Korrespondenzsuche gefunden werden können, mit Hilfe der Ausgleichsrechnung minimiert werden.

GRODECKI & DIAL (2003) schlagen in ihrem Paper vor, gemessene korrespondierende Punkte bzw. Ground Control Points (GCPs) in den Bildern j im Bildkoordinatensystem zu messen, und die gemessenen Differenzen für jedes Bild in zwei Funktionen $\Delta p^{(j)}$ und $\Delta r^{(j)}$ auszudrücken. Die Funktionen $\Delta p^{(j)}$ und $\Delta r^{(j)}$ sind Polynome, welche durch Line und Sample (Bildkoordinaten) sowie Koeffizienten a_0, a_S, a_L für $\Delta p^{(j)}$ und b_0, b_S, b_L für $\Delta r^{(j)}$ ausgedrückt werden. GRODECKI UND DIAL (2003) beschreiben dabei das RPC Blockausgleichungsmodell für jeden Bildpunkt i mit k Kontrollpunkten für eine affine Transformation (alternativ auch einer Transformation höheren Grades) wie folgt:

$$\begin{aligned} Line_i^{(j)} &= \Delta p^{(j)} + \Delta p^{(j)}(\varphi_k, \lambda_k, h_k) + \varepsilon_{L_i} \\ Sample_i^{(j)} &= \Delta r^{(j)} + \Delta r^{(j)}(\varphi_k, \lambda_k, h_k) + \varepsilon_{S_i} \end{aligned} \quad (3)$$

Wobei ε ein kleiner, zufälliger unbeobachtbarer Fehler ist. Äquivalent können auch Polynome höherer Ordnung für die Ausgleichung verwendet werden. Sie beschreiben dabei die Möglichkeit, bei

ausreichend guten Tie Points (Korrespondierende Punkte in allen Bildern) durch einen einzigen Ground-Control Point eine gute absolute Lage aller Bilder modellieren zu können. GRODECKI UND DIAL stellen in ihrem Paper anschließend ein Lösungsverfahren vor, mit dem das Bundle Block adjustment von RPC-modellierten Daten mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Quadrate (HANSEN ET AL., 2012) gelöst werden kann.

Funktionaler Aufbau stereofähiger Satellitensysteme

Es gibt zwei Konstruktionsmöglichkeiten für ein stereofähiges Satellitensystem: Systeme mit einem einzigen Sensor und Systeme mit mehreren Sensoren. Diese beiden Konstruktionsmöglichkeiten und deren Unterschiede werden im Folgenden einzeln erläutert. Alle bisher vorgestellten optischen Systeme arbeiten mit sog. Zeilenscannern, sie bilden also eine pixelbreite Bildzeile während ihres Überflugs ab. Der Vorteil an Zeilenscannern ist, dass dadurch großflächige Gebiete abgebildet werden können, welche theoretisch gesehen eine beliebige Länge und eine große Breite besitzen können, die durch die Dimensionierung der Sensorzeile und den Speicher des Systems begrenzt ist. Optische Satelliten, welche nach dem Lochkameramodell funktionieren, wurden mit dem Einzug der ersten optischen Sensoren abgelöst. Mitunter funktionierten einige Spionagesatelliten (z.B. KH-9) des amerikanischen Geheimdienstes und Militärs sowie viele russische Systeme in den 1980er Jahren nach dem Lochkameraprinzip und bildeten ihre Ziele auf fotosensitivem Material ab, welches später wieder für die Auswertung auf die Erde stürzte. Mit Keyhole-11⁶ wurde erstmals auf ein zweidimensionales Sensorarray⁷ aufgenommen. Seit kurzem jedoch bilden die Satellitenkonstellation Skybox⁸ mit ihren Skynode Satelliten, und die Kameras des Urthecast-Projekts,⁹ welche auf der internationalen Raumstation montiert sind, eine Ausnahme auf diesem Gebiet. Diese sind nach dem Lochkameramodell aufgebaut und bilden dadurch einen weitaus kleineren Ausschnitt als Push-Broom-Sensoren ab. Sie sind jedoch in der Lage, durch die gleichzeitige Aufnahme aller Bereiche des abzubildenden Gebiets, kurze Filmaufnahmen durchzuführen.

Time Delay Integration Sensoren und Quantisierung

Die Geschwindigkeit eines optischen VHR Systems, welches in einem Orbit zwischen den Höhen 450 und 680 km befindet, beträgt etwa 7km/s. Berechnet man die Zeit, die der VHR-Satellit nach dem Push-Broom Prinzip für die Belichtung eines Pixels hat, liegt diese unter 0,1 ms (JACOBSEN, 2005). Diese Zeitspanne ist selbst für leistungsfähige Sensoren sehr kurz. Aus diesem Grund besitzen viele VHR-Systeme sogenannte Time Delay Integration Sensoren (TDI Sensoren). Die TDI Sensoren bestehen aus mehreren lichtempfindlichen Sensorzeilen, auf die dasselbe Gebiet mehrfach kurz hintereinander abgebildet wird. Die einzelnen Ladungen werden am Ende dieser Sensorzeilen akkumuliert und als Grauwert gespeichert (SANDAU, 2005). Der Sensoren Geoeye-1 und Worldview-2 besitzen für die panchromatische Aufnahme 64 sog. TDI-Stufen (Abbildung 8). Bei der Verwendung von TDI-Sensoren kann es zu Effekten kommen, die eine Unschärfe im Bild hervorrufen können (BALTSAVIAS ET AL.,

⁶ Deklassifizierte Dokumente erreichbar unter <http://www.nro.gov/history/csnr/corona/> (Aufgerufen 22.2.2014)

⁷ Ein Sensorarray ist eine bestimmte Anordnung mehrerer Sensorzellen. Zweidimensionale Sensorarrays, wie sie in herkömmlichen digitalen Kameras verwendet werden, bilden quasi gleichzeitig einen quadratischen Bereich ab. Eindimensionale Sensorarrays werden beispielsweise in Push-Broom Sensoren eingesetzt und bestehen aus einzelnen, in einer Reihe aneinandergereihten einzelnen Sensoren.

⁸ Skybox Datasheet <http://www.skybox.com/uploads/10/08/imageryandvideospecsheet.pdf> (Aufgerufen 21.2.2014)

⁹ Urthecast Internetseite <http://www.urthecast.com/features> (Aufgerufen 22.2.2014)

2001). Dennoch ist der Einsatz von TDI Sensoren sinnvoll, da auf diesem Weg aktiv die Belichtung der Sensoren gesteuert werden kann. Es kann beispielsweise verhindert werden, dass sehr stark reflektierende Bereiche überstrahlt werden, und damit keine Grauwertabstufung mehr möglich ist. Worldview-2 besitzt wie viele VHR-Systeme eine 11-Bit Quantisierung. Damit lassen sich die empfangenen Ladungen also in 2^{11} mögliche Grauwertstufen aufteilen. Die maximale Anzahl von Quantisierungsbits hängt auch mit dem Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) zusammen, welche die maximal sinnvolle Obergrenze für diese aufzeigt. Das neu im Orbit befindliche, südkoreanische System Kompsat-3¹⁰ bietet beispielsweise eine Quantisierung von 14 Bit (entspricht 16384 Grauwertstufen).

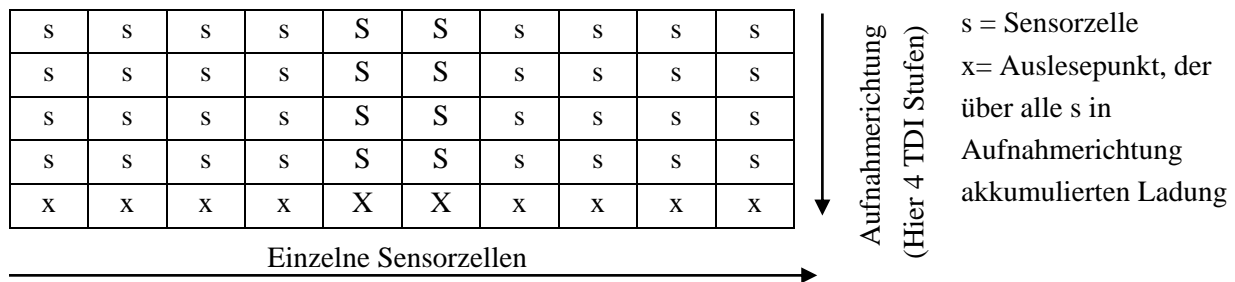


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung des TDI-Prinzips

Systeme mit einem einzigen Sensor

Der Hauptunterschied zu Systemen mit mehreren Sensoren für die Stereobildaufnahme ist, dass solche für eine zweite Aufnahme eine Schwenkbewegung durchführen müssen, um einen äquivalenten Bildausschnitt unter einem anderen Winkel quasi zeitgleich aufzunehmen. Die Möglichkeit, das Satellitensystem vor der Aufnahme in eine beliebige Aufnahmeposition zu bringen, ist besonders für die Rekonstruktion von Höhenmodellen aus Stereodaten relevant. Durch die Variabilität der Aufnahmewinkel kann dadurch das für die Stereorekonstruktion nötige Basis-zu-Höhenverhältnis (Base to height ratio, B/H) angepasst werden und somit die Stereorekonstruktion optimiert und den entsprechenden Bedürfnissen angepasst werden. Auch auf Grund der Topographie eines AOI kann es nötig sein, die Aufnahmewinkel so anzupassen, dass Verdeckungen minimiert werden. Vereinfacht kann gesagt werden, dass der Satellit durch die Anpassung des Aufnahmewinkels Bereiche aufnehmen kann, die er unter anderen Aufnahmebedingungen nicht aufnehmen kann, da diese sonst verdeckt wären. Ebenso ist es möglich, Multistereo-Aufnahmen (mehr als zwei Aufnahmen) durchzuführen. Damit lassen sich besonders in urbanen Gebieten oder Gebieten mit starkem Relief Verdeckungen minimieren. In folgender Skizze soll die Minimierung von Verdeckungen durch eine dritte Aufnahme verdeutlicht werden. Damit ein Matching durchgeführt werden kann, ist es nötig, dass es mindestens ein Bildpaar gibt, welches denselben Bereich abbildet. Es reicht somit nicht, dass ein verdeckter Bereich durch ein Bild abgedeckt wird.

¹⁰ Kompsat-3 Spezifikationen erreichbar unter <https://apollomapping.com/imagery/high-resolution-imagery/kompsat-3> (Aufgerufen 22.2.2014)

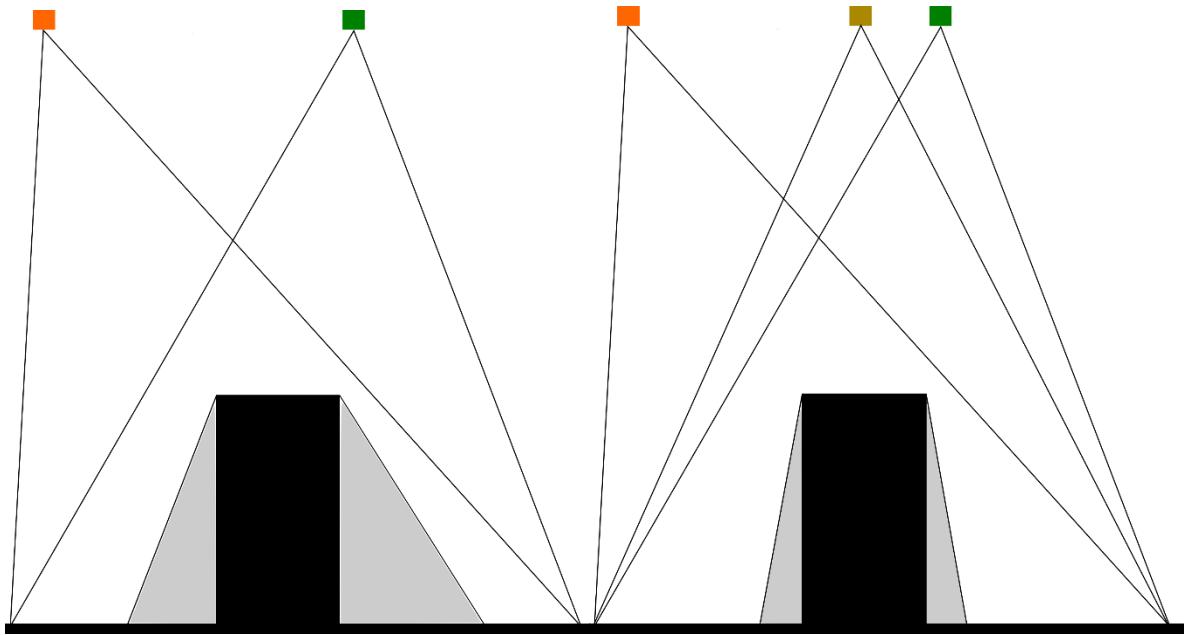


Abbildung 9: Verdeckung
 Vereinfachte Darstellung eines Bereichs, der aus einem Blickwinkel verdeckt ist
 Links: Minimierung dieses Bereichs
 Rechts: durch zwei bzw. drei Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln.
 Orange, Grün und Olivgrün: aktuelle Position des Satelliten

Abhängig davon, wie schnell ein System eine Schwenkbewegung durchführen kann, ist es möglich, mehr als eine Aufnahme eines größeren Bereichs aus einem Orbit (bzw. aus einem Überflug) aufzunehmen. Die Zeit, die ein System benötigt, um von einem Ziel auf ein anderes Ziel mit einer bestimmten Distanz zu schwenken, wird *slew-Time* genannt. Die *slew-Time* ist abhängig von der Leistung der im System verbauten Gyroskope (Abbildung 10). Die Gyroskope sind in der Lage, den gesamten Satelliten bzw. einzelne Instrumente zu schwenken. Betrachtet man den Satelliten Worldview-2 hinsichtlich seiner Agilität, gibt der Hersteller eine *slew-Time* von 10 Sekunden für eine Distanz von 200 km. Der Hersteller gibt ebenso einen Wert von $1,43 \frac{\text{Dezimalgrad}}{\text{s}^2}$ für die Beschleunigung bzw. eine Geschwindigkeit von $3,86 \frac{\text{Dezimalgrad}}{\text{s}}$ für Schwenkbewegungen des Satellitensystems an¹¹. Bei mehreren Aufnahmen einer AOI aus einem Orbit bedeutet das, dass der Satellit mit seinem Zeilenscanner vorerst einen Streifen einer bestimmten Länge aufnehmen muss, um dann anschließend so zu schwenken, dass die zweite Aufnahme die erste Aufnahme komplett überlappt. Dabei muss der Satellit, vereinfacht gesehen, einerseits die während der ersten Aufnahme zurückgelegte Flugstrecke und die während der Schwenkbewegung selbst zurückgelegte Flugstrecke ausgleichen, um den gleichen Bereich erneut aufnehmen zu können. Ebenso muss das System in manchen Fällen die Erdrotation durch eine *gier-Bewegung* (engl. *yaw*) ausgleichen, um exakt denselben Bereich aufzunehmen. Der Aufnahmewinkel ändert sich durch die zurückgelegte Strecke des Satelliten zwangsläufig. Je nach *slew-Time* des Satelliten kann dadurch eine unterschiedliche Anzahl von Aufnahmen des gleichen Ziels aus einem Orbit aufgenommen werden.

¹¹ Digital Globe Core Imagery Products Guide,
http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide_0.pdf (Aufgerufen 23.12.2013)

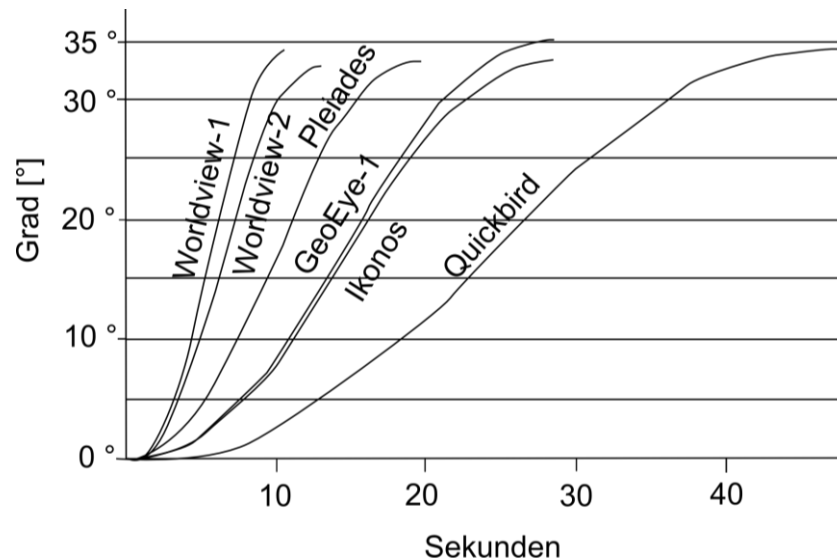


Abbildung 10: Slew Time moderner VHR Sensoren

Mittlere Zeit, die für das Schwenken des Systems um einen bestimmten Winkel benötigt wird.

Verändert nach JACOBSEN (2013)

Im folgenden Beispiel für eine Stereoaufnahme wird die Erde der Übersichtlichkeit halber als planare Fläche angenommen. Ebenso wird die Geschwindigkeit der Winkeländerung für den gesamten Aufnahmewinkelbereich als konstant angenommen. Folgende Darstellung soll mit einer statischen slew-Time vier aufeinanderfolgende Aufnahmen eines 200 km langen Aufnahmebereichs AOI ab einem Off-Nadir Winkel $\omega_1 = -30^\circ$ erläutern. Winkel $\omega_1 \dots \omega_4$ sind von der jeweiligen aktuellen Position $P_1 \dots P_4$ an zur Senkrechten auf A_1 aufgetragen und zeigen somit den Offnadirwinkel an. Die Positionen $P_1 \dots P_4$ bestimmen die jeweilige Position zum Aufnahmebeginn des Aufnahmestreifens $A_1 A_2$.

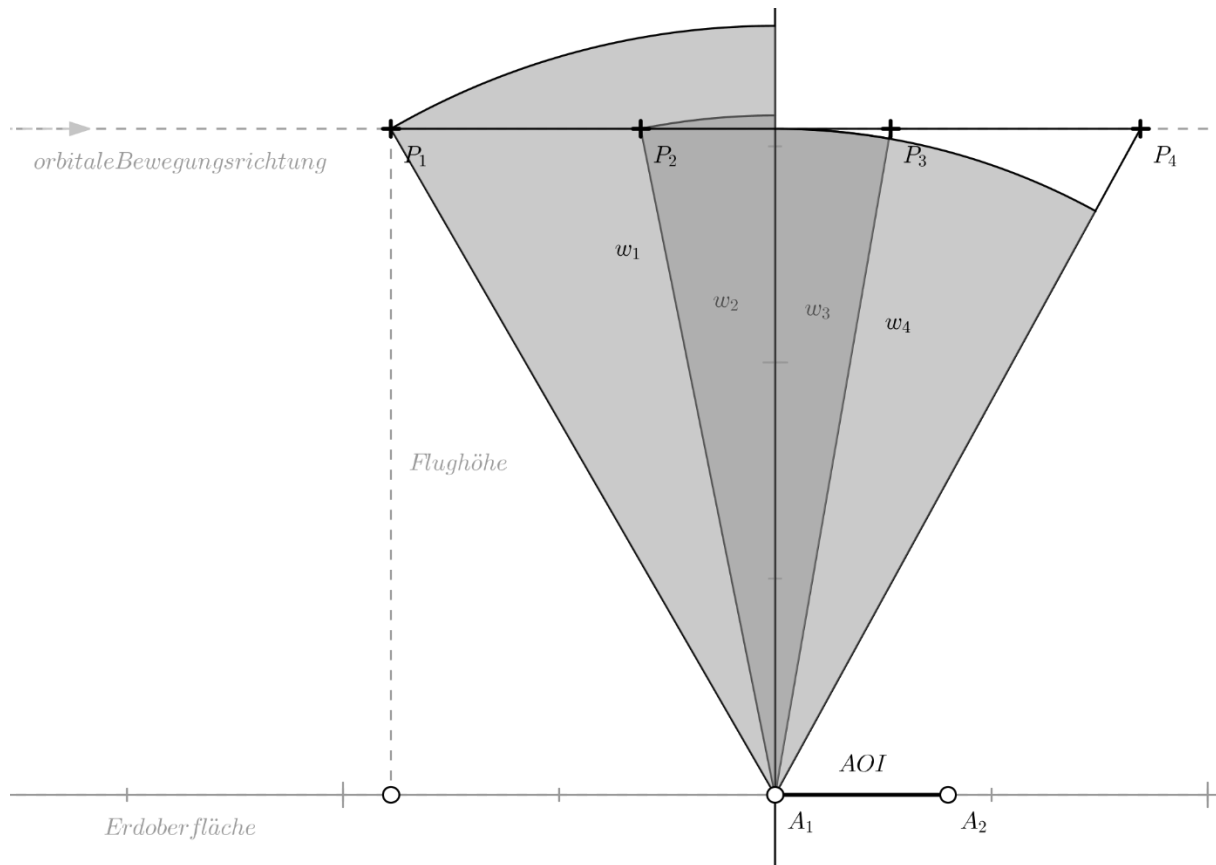


Abbildung 11: Skizze vier aufeinanderfolgender Aufnahmen

Strecke $P_i A_1$: Strahlengang der Blickwinkel zum Aufnahmebeginn des Aufnahmestreifens $A_1 A_2$ (AOI).

w_i : Offnadirwinkel der entsprechenden Aufnahme

P_i : Positionen zum Beginn einer neuen Aufnahme

In folgender Tabelle wird eine Übersicht über aktuelle und zukünftige stereofähige Systeme mit einem oder mehreren Sensoren gegeben

Tabelle 1: Übersicht aktueller und geplanter stereofähiger Satellitensysteme¹²
erweitert nach JACOBSEN, 2005

Kanäle: PAN = Panchromatisch, B = Blau, G = Grün, R = Rot, NIR = Nahes Infrarot, SWIR = kurzwelliges Infrarot

System	Kanäle	GSD (m)	Swath-breite (km)	Revisit Rate (Tage)	Stereoaufnahme-winkel (Dezimalgrad)	Art der Aufnahme
World-view-3	PAN 16 Multis. 12 Spezial	0,5 1,24 – 3,7 30	13,1	1	Beliebig	along-/across-track
SPOT-6/7	PAN B,G,R,NIR	1,5 6	60	1	Beliebig	along-/across-track
Pleiades 1A/1B	PAN B,G,R,NIR	0,5 2	20	1	Beliebig	along-/across-track
World-view-2	PAN Coastal,B, G,Y,R,Red- Edge,NIR- 1,NIR-2	0,5 2	16,4	1,1	Beliebig	along-/across-track
SPOT 5	HRG	10/20	60	1-4 (Nadir: 26)	±27° max	across-track
	Instrument: G,R,NIR,S WIR,PAN	2,5/5 5/10	120	26	±20° (fix)	along-track
	HRS: PAN					
IRS-P5	PAN	2,5	27	5 (bei ± 27 °) 116 (Nadir)	+26°/ -6°	along-track
Quick-bird 2	PAN R,G,B,NIR	0,7 2,8	16,5	3,5	1-3,5	along-/across-track
ASTER	G,R,NIR	15	60	4-16	27,7°	along-track

Systeme mit mehreren Sensoren zur Stereoaufnahme

Stereosysteme mit mehreren Sensoren zur Stereoaufnahme, wie zum Beispiel der indische Fernerkundungssatellit Cartosat-1 (CARTOSAT-1 DATA USER'S HANDBOOK), müssen auf Grund ihrer Bauweise keine Schwenkbewegung durchführen, um ein Ziel aus verschiedenen Winkeln aus einem Überflug aufzunehmen. Sie besitzen zwei Sensorzeilen, welche in verschiedenen Winkeln statisch am Satelliten angebracht sind. Durch diese Anordnung wird das Ziel vom Satelliten mit zeitlichem Abstand

¹² Aus Eckard, Börner, Lehman, Photogrammetrische Woche 2013, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/phowo/presentations/150eckhardt.pdf> (Aufgerufen 23.2.2014)

nacheinander aufgenommen. Die Aufnahmen sind dabei zeitlich konstant etwa 52 Sekunden voneinander versetzt (CARTOSAT-1 DATA USERS'S HANDBOOK). Die Sensorzeilen sind mit $+26^\circ$ („Aft“ Kamera) und -5° („Fore“ Kamera) zum Nadir der Erdoberfläche am Satelliten angebracht.

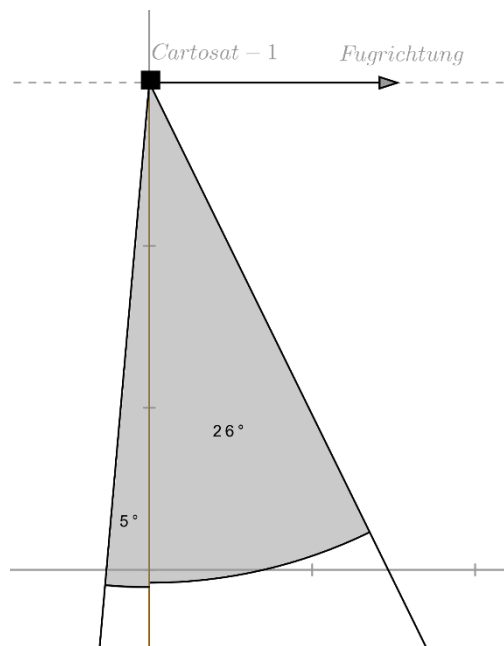


Abbildung 12: Fixe Aufnahmewinkel des Satelliten Cartosat-1

Es ergibt sich daraus eine statische B/H von 0,62. Hauptvorteil dieser fixen Aufnahmegeometrie ist die Möglichkeit, kontinuierlich Stereoaufnahmen zu tätigen, ohne dass das System geschwenkt werden muss. Nachteil eines solchen Systems ist die fehlende Flexibilität, die Aufnahmewinkel (beispielsweise einer bestimmten topographischen Situation) anzupassen. Ein weiterer Vorteil ist die gute Vorhersagbarkeit der vertikalen und horizontalen Genauigkeit der resultierenden Höhenmodelle durch eine gleichbleibende Stereogeometrie. Speziell Cartosat-1 ist für die großflächige Ableitung von optischen Daten sowie Höhenmodellen für großflächige Kartierung entworfen worden und hat aus diesem Grund auch eine hohe Anforderung an gleichbleibende horizontale und vertikale Genauigkeit.

2.2 Aufnahmegeometrie und Kombinationsmöglichkeiten

Neben den technischen Aspekten hat die Aufnahmegeometrie der Stereoaufnahmen einen großen Einfluss auf das resultierende Höhenmodell. Genauigkeit und Vollständigkeit sind abhängig von den im Folgenden erläuterten Stereowinkeln. Im Abschnitt „Mehrfachstereo“ sollen kurz die Möglichkeiten aufgezeigt werden, mehr als zwei Szenen für die Rekonstruktion von Höhen zu verwenden, und mit den daraus entstandenen redundanten Höhen ein Höhenmodell zu erzeugen.

2.2.1 Winkel in der Stereoaufnahmegeometrie

In der Geschichte der Ableitung von Höhenmodellen aus optischen Daten stellte bereits 1989 COLONEL JOEL MALCOM CAIN (CAIN, 1989) in seiner Dissertation fest, dass die Aufnahmegeometrie, in der die einzelnen Aufnahmen für eine Stereorekonstruktion aufgenommen werden, starke Auswirkung auf die Qualität der resultierenden Höhenmodelle hat. Seine Aussagen sind trotz technischer Weiterentwicklungen in der Sensorik immer noch gültig und sollen in diesem Abschnitt ebenfalls

erläutert werden. Um in folgenden Kapiteln und im analytischen bzw. praktischen Teil die Aufnahmegeometrie klar beschreiben zu können, wird in diesem Abschnitt auf die einzelnen Winkel, welche im Aufnahmegeometrischen Modell relevant sind, eingegangen. Es wird versucht, diese zu erläutern. Speziell wird der Konvergenzwinkel (C) α , der Asymmetriewinkel (AE) β und der Bisector-Elevationswinkel (BIE) γ erläutert. Um diese speziellen Winkel zu erläutern werden zusätzlich einige darauf bezogene Termini eingeführt. Dem Kapitel „Grundlagen der Computervision“ werden einige Begriffe vorweg genommen, um den Bezug auf Satellitendaten besser herstellen zu können.

Grundlegende Aufnahmegeometrie und das Stereo-Dilemma

Wie bereits im letzten Kapitel erwähnt, gibt es Systeme mit fixen und variablen B/H. Die Basis einer Stereoaufnahme definiert sich durch die halbe Strecke zwischen den Kameras¹³. Das Verhältnis zwischen den Strecken Basislinie und Höhe bildet die B/H. (CAIN, 1989). Daraus spannt sich der Konvergenzwinkel α auf, der die schwerwiegendsten Auswirkungen auf das resultierende DHM hat. Von den beiden Strahlen P_1 und P_2 wird die sogenannte Epipolarebene aufgespannt, die im Kapitel „Grundlagen der Computervision“ genauer erklärt wird. Während CAIN (1989) bereits einen Zusammenhang zwischen Konvergenzwinkel und resultierender vertikaler bzw. horizontaler Genauigkeit zeigte, bewiesen GRODECKI ET AL. (2004) in ihrem Paper „mathematical model for 3d feature extraction from multiple satellite images described by RPCs“ unter anderem eine Abhängigkeit der vertikalen und horizontalen Genauigkeit von α im Fallbeispiel des Satelliten Ikonos. Grodecki et al. zeigten in ihrem Paper, dass bei Vergrößerung des Konvergenzwinkels die vertikale Genauigkeit steigt, während die horizontale Genauigkeit sich im direkten Vergleich dazu verschlechtert. DOLOFF ET AL. (2012) beschreiben in ihrem Paper „Temporal Correlation of Metadata Errors for Commercial Satellite Images: Representation and Effects on Stereo Extraction Accuracy“, dass neben dem Konvergenzwinkel die Metadaten der Eingangsbilder eine große Rolle spielen. Sie stellen dabei heraus, dass sich auf Grund von größeren zeitlichen Abständen zwischen Aufnahmen auch die Genauigkeit bzw. die Ausprägung der Fehler in den Metadaten verändert, insbesondere jener relevanten Messwerte, welche die Positionierung der Satelliten messen. In der Praxis wären das GPS-Messungen und Messungen durch interne Systeme, die Sterne beobachten und die Telemetrie-Daten liefern. Resultat sind bei temporal stark korrelierenden Bildern bzw. Metadaten ähnliche geometrische Fehler in den Bildern, die sich weniger auf die Genauigkeit auswirken als temporal abweichende Bilder mit dadurch unkorrelierteren Fehlern in den Metadaten. Bei gering temporal korrelierenden Bildern sinkt laut DOLOFF ET AL. (2012) besonders die horizontale Genauigkeit sehr stark. Durch eine schlechte horizontale Genauigkeit sinkt damit auch die entsprechende Genauigkeit resultierender Höhenmodelle. In einem praktischen Test beobachteten LI ET AL. (2009) in ihrem Paper „Impact of Imaging Geometry on 3D Geopositioning Accuracy of Stereo Ikonos Imagery“, das sich mit einer Genauigkeitsuntersuchung von Stereopaaren in verschiedenen Winkelkonfigurationen beschäftigt, dass der Konvergenzwinkel besonders in der Genauigkeit der along-track Richtung eine große Wirkung hat.

Das Dilemma, zwischen niedrigem Konvergenzwinkel mit höherer horizontaler Genauigkeit bzw. höherer vertikaler Genauigkeit mit hohem Konvergenzwinkel zu wählen, nennt sich Stereo-Dilemma.

Der Konvergenzwinkel α kann bei gegebenen Elevations- und Azimutwinkeln ω und δ zweier Bilder folgendermaßen berechnet werden (CAIN, 1989):

¹³ bzw. den Satellitenstandpunkten P_1, P_2 zum Aufnahmebeginn

$$\cos \alpha = \sin \omega_1 * \sin \omega_2 + \cos \omega_1 * \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (4)$$

Teilt man die Strecke P_1P_2 , erhält man den Mittelpunkt (Bisektor) der Strecke, Punkt B . Die Strecke BR wird von CAIN (1989) als sog. Bisektor-Strahl beschrieben. Fällt man das Lot vom Bisektor B auf die Oberfläche, entsteht ein rechtwinkliges Dreieck $ABET$. Winkel β wird von Cain als Bisektor-Elevationswinkel beschrieben. Mit diesem wird zusammen mit dem Asymmetrie-Winkel γ die Abweichung der Blickwinkel der Satelliten zu einem Modell, bei dem die Normale von B genau das Ziel (Target) T schneidet. Die somit entstehenden Effekte sind leicht zu verdeutlichen. Ein hoher Asymmetrie-Winkel bedeutet, dass die Umklappeffekte entlang der Strecke P_1P_2 in unterschiedlicher Ausprägung je Bild entstehen. Ein Asymmetrie-Winkel von 0° würde identische Umklappeffekte in Richtung P_1P_2 in beiden Bildern entstehen lassen. Bei einem niedrigeren Bisektor-Elevationswinkel verläuft die Strecke P_1P_2 nah an am Ziel T , was wiederum bedeutet, dass wenig Umklappeffekte quer zu P_1P_2 entstehen. Umgekehrt entstehen bei einem höheren Bisektor-Elevationswinkel mehr Umklappeffekte quer zu P_1P_2 .

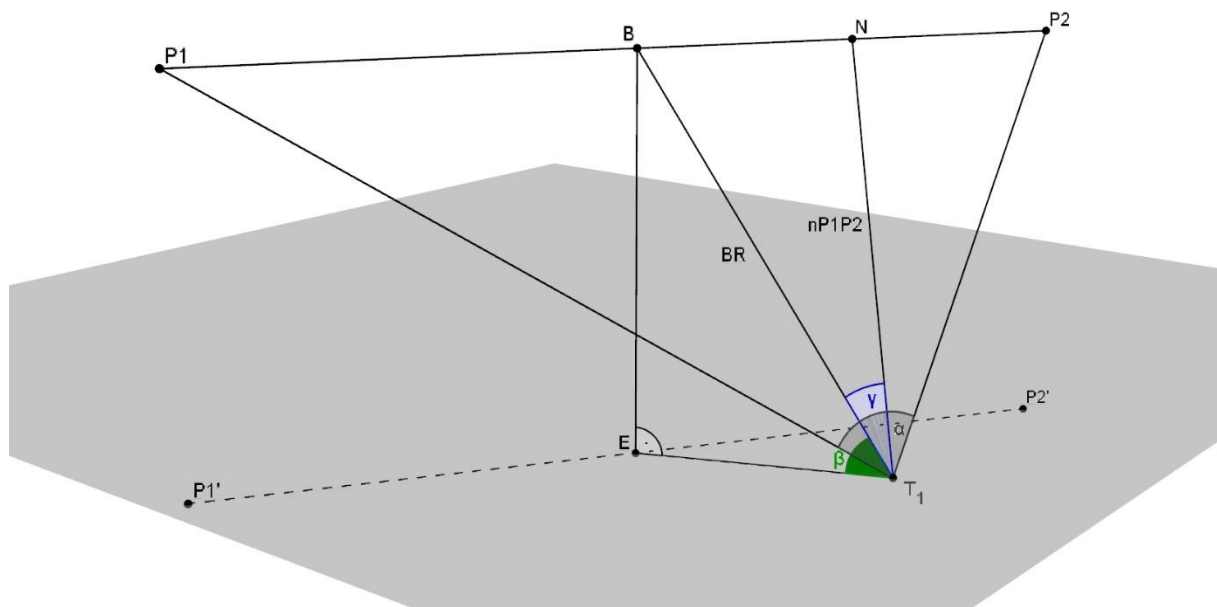


Abbildung 13: Stereowinkel in der Stereogeometrie
 P_1, P_2 : Positionen der Satelliten zur Aufnahme
 B : Basis
 BE : Höhe
 T : Ziel
 α : Konvergenzwinkel
 β : Bisektor Elevationswinkel
 γ : Asymmetrie Winkel

Die Winkel in der Stereoaufnahmegeometrie können auch mit Hilfe von Skyplots (2.1.1) verdeutlicht werden. Durch die Darstellung im Skyplot sind sie jedoch nicht mehr so gut ersichtlich wie in Abbildung 13.

2.2.2 Mehrfachstereo

Es besteht die Möglichkeit, für die Erstellung eines Höhenmodells mehr als zwei Bilder zu verwenden. Der Vorteil dabei ist, dass (wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben wird) deutlich weniger Verdeckungen

entstehen. Gerade in urbanen Gebieten, in welchen die Verdeckung von Objekten durch Gebäude bei einem einzelnen Stereopaar zu groß wäre, werden Mehrfachstereoaufnahmen in der Praxis oft verwendet. Die Verwendung mehrerer Bilder kann auch vorteilhafte Effekte auf die Lagegenauigkeit des Höhenmodells haben. Drei Bilder, ein sog. Triplet, minimieren die Verdeckungen in den meisten Fällen so weit, dass eine eindeutige Trennung zwischen den Gebäuden möglich ist. Bei der Prozessierung werden Korrespondenzen in jedem Bild untereinander gesucht, um somit einerseits eine hohe Vollständigkeit, andererseits eine Redundanz an Höheninformation zu erhalten. Durch die resultierende Redundanz bietet sich die Möglichkeit, die endgültigen Höhenwerte aus einer größeren Anzahl von Höhenwerten nach bestimmten Kriterien auszuwählen oder zu interpolieren.

Fusion mehrerer Höhenmodelle

Eine Einsatzmöglichkeit einer solchen Redundanz ist beispielsweise die Verwendung eines statistisch ermittelten Höhenwerts. In dieser Arbeit werden die Höhenwerte in aufsteigender Reihenfolge aufgereiht, und derjenige Höhenwert verwendet, welcher in der Mitte der Aufreihung liegt (Median). Sollte eine gerade Anzahl von Höhenwerten vorhanden sein, wird der niedrigere Höhenwert der beiden mittig positionierten Höhenwerte verwendet. Durch höhere Redundanz können auch Ausreißer gefunden werden, indem man eine maximale Distanz zum Median oder ähnliche Regeln auf die resultierenden Höhenwerte anwendet. Ebenso können dabei regionenbasierende Techniken nach dem Matching verwendet werden, um ganze Bereiche von Ausreißern auszuschließen, um bei der Ausreißerdetektion ebenso den Kontext des Höhenmodells zu betrachten (D'ANGELO, 2010). Beachtet man, dass ein Matching eines Stereopaars jeweils in zwei Richtungen durchgeführt werden kann, ergeben sich $n * (n - 1)$ mögliche einzelne Höhenmodelle¹⁴. Wenn in dieser Arbeit von einem Höhenmodell eines Stereopaars gesprochen wird, wird davon ausgegangen, dass innerhalb dieses Stereopaars in beiden Bildern gegenseitig ein Matching durchgeführt wurde. Dies ist unter anderem nötig, da bei dem in dieser Arbeit verwendeten Matchingverfahren verdeckte Bereiche durch eine Überprüfung in beide Richtungen festgestellt werden. Bei einem Stereopaar AB beispielsweise wird mit den Bildern A und B sowie B und A ein Matching durchgeführt und die resultierenden Höhenwerte werden weiterverarbeitet. Eine hohe Redundanz an eingeflossenen Werten bedeutet auch eine Reduktion von Ausreißern, sowie eine höhere Vollständigkeit im Höhenmodell. Somit bedeuten mehr eingeflossene Einzelbilder in vielen Fällen eine qualitative Steigerung des resultierenden Höhenmodells. Auf Grund des hohen Preises und der Verfügbarkeit der Aufnahmen von VHR-Satelliten, werden in der praktischen Anwendung oft statt fünf oder mehr Bildern nur zwei (in flachen Gebieten) oder drei (in urbanen oder reliefierten Gebieten) verwendet. Obwohl eine minimale Erhöhung der Vollständigkeit und der Genauigkeit beim Matching mit fünf Bildern im Gegensatz zu drei messbar ist (D'ANGELO & KUSCHK, 2012), wird eine minimale Reduktion der Vollständigkeit der Höhenmodelle in der praktischen Anwendung oft in Kauf genommen.

¹⁴ n sei Anzahl der Bilder

gewichtete Fusion und Ausreißereliminierung

D'ANGELO & KUSCHK (2012) stellten in Ihrem Paper „Dense Multi-view Stereo from Satellite Imagery“ fest, dass mehr als fünf eingeflossene Einzelbilder wenige Verbesserungen bezüglich der hinzugewonnenen Qualität und der Vollständigkeit des Höhenmodells bewirken. Gängige Techniken für das Zusammenführen von einzelnen Höhen der Matches sind ungewichtet und behandeln alle Höhenwerte aus den Ausgangsdaten gleich. Betrachtet man die Situation, dass aus Archivdaten ein Höhenmodell erstellt werden soll, müssen oft Kompromisse bezüglich der Konvergenzwinkel oder des Asymmetriewinkels getroffen werden. Das resultiert darin, dass ein oder mehrere Stereopaare mit hoher Wahrscheinlichkeit schlechtere oder unsichere Ergebnisse bezüglich ihrer Höhengenaugkeit produzieren. Für Archivaufnahmen ist es deshalb unter Umständen sinnvoll, die einzelnen Matches an Hand dieser bekannten, die Qualität beeinflussenden Faktoren, in einer gewichteten Form zu fusionieren. Gerade bei höheren Redundanzen kann sich ein solches Verfahren als sinnvoll erweisen.

Mögliche sinnvolle Methoden, Gruppen potentiell richtiger Höhenwerte zu finden, kann ein Clustering bzw. eine Klasseneinteilung in vertikaler Richtung der Matches darstellen. Eine solche Gruppierung kann Matches, welche sich innerhalb einer solchen Gruppe befinden, mit einer höheren Gewichtung in den resultierenden Höhenwert einfließen lassen, als Matches, welche sich außerhalb der Gruppe befinden. Im Laufe des Entstehungsprozesses dieser Arbeit wurde versucht, ein iteratives Verfahren zu entwickeln, welches vertikal aufgereichte Höhenwerte a priori bewerteter Kombinationen, abhängig von ihrer Bewertung, in Richtung besser bewerteter Kombinationen zu verschieben. Ebenso wurde versucht, vertikal aufgereichte und sortierte Höhenwerte, durch ein auf dem K-means Verfahren (DUDA ET AL., 1995) mit der Cityblock-Distanz als Distanzmaß in zwei Klassen zu clustern und anschließend den mittleren Höhenwert des Clusters mit den meisten eingeflossenen Höhenwerten als resultierenden Höhenwert zu verwenden. Sowohl das iterative Verfahren, als auch das Verfahren, welches auf Clustering basiert, wiesen in den resultierenden Höhenmodellen ein starkes Rauschen auf und werden deshalb nicht weiter in dieser Arbeit beschrieben. Es existiert jedoch ein Verfahren (KUSCHK & D'ANGELO, 2013), welches neben den vertikal aufgereichten Höhenwerten auch die horizontalen Nachbarn der Höhenwerte mit einbezieht und optimale Höhenwerte, mit Hilfe einer Glattheitsbedingung findet. Dabei können einzelne Höhenmodelle, welche die Eingangsdaten für diese Technik darstellen, auf verschiedene Weise gewichtet werden. Diese Technik kann ein Höhenmodell mit minimalem Rauschen produzieren und gleichzeitig auch an harten Kanten gute Ergebnisse liefern, ohne diese zu verwischen. Da diese Technik ebenso eine Gewichtung einzelner einfließender Höhenmodelle erlaubt, lassen sich bessere Ergebnisse bei across-track gematchten Höhenmodellen bzw. Höhenmodellen aus vielen Einzelbildern erwarten. Die Ergebnisse dieser oder ähnlicher Techniken, in Kombination mit einer Gewichtung bezüglich des zeitlichen Abstands und der Stereowinkel könnten durch weitere Untersuchungen mit across-track Höhenmodellen überprüft werden.

3 GRUNDLAGEN DER COMPUTERVISION

Die relativ junge Disziplin der Computervision entstand aus der Frage heraus, wie das menschliche Auge in Zusammenarbeit mit dem Gehirn die Umgebung wahrnimmt, diese in Vor- und Hintergrund trennt, verarbeitet, und das Wahrgenommene mit bestehenden Informationen verknüpft. Das Ziel der Computervision ist, diese Prozesse mit Hilfe von Computersystemen nachzuempfinden und mathematisch bzw. algorithmisch nachzubilden. Mittlerweile ist es möglich, mit genügend einzelnen Fotografien eines Objekts eine dichte dreidimensionale Rekonstruktion dieses Objekts durchzuführen. Es können markante Punkte oder Features in Bildern, welche von Kameras aufgenommen wurden, vom Hintergrund isoliert als auch auf verschiedene Art und Weise analysiert werden, um Informationen zu extrahieren. Dem Verfahren der Mustererkennung ist es mittlerweile möglich, selbst unvollständige oder undeutliche Handschriften zu analysieren oder zu lesen. Dennoch ist die Computervision auf Grund des Entwicklungsstandes der Algorithmen und der fehlenden Leistung der Computersysteme, welche eine echtzeitnahe Berechnung einzelner Algorithmen zwar annähernd durchführen können, weit davon entfernt, eine Synthese mehrerer komplexer Algorithmen ohne Zeitunterschied zu berechnen, wie es dem menschlichen Gehirn möglich ist. SZELISKI (2011) nennt neben diesen Beispielen folgende Anwendungen der Computervision, die in der realen Welt bereits eingesetzt werden:

- Optische Buchstabenerkennung (OCR)
- Maschineninspektion (zum Beispiel um Fehler in metallischen Maschinenteilen, wie Flugzeugflügeln oder Autoteilen zu finden)
- Systeme für automatisierte Einkaufsabrechnungen in Supermärkten
- 3D Rekonstruktion von Gebäuden und Oberflächen (Photogrammetrie)
- Medizinische Bildverarbeitung
- Verkehrssicherheit
- Animationstechnik
- Bewegungserkennung (zum Beispiel für Filme)
- Überwachung
- Fingerabdruckerkennung und Biometrie

Auf Grund dieser zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten ist die Tiefenrekonstruktion aus Stereobildern ein Forschungszweig, der viele Adaptionen für bestimmte Anwendungen erfordert. Dabei spielen Prozessierungsgeschwindigkeit, Detailgrad, prozentualer Anteil der rekonstruierten Bereiche, Robustheit gegenüber verschiedener Effekte, Rauschen, Genauigkeit oder Kombinationen aus diesen Eigenschaften eine verschieden große Rolle. Für Fahrassistenzsysteme ist beispielsweise der Detailgrad weniger wichtig als die Prozessierungsgeschwindigkeit und die Robustheit. Viele dieser Eigenschaften können mittlerweile durch verschiedene Algorithmen sehr gut erfüllt werden, vorausgesetzt die Prozessierungsgeschwindigkeit spielt keine zu große Rolle.

Vergleich von Algorithmen

Für einen qualitativen und quantitativen Vergleich verschiedener Algorithmen zur Stereorekonstruktion stellt das Middlebury Stereo Benchmark¹⁵ mehrere Beispielbilder inklusive einer Ground Truth¹⁶ bereit um Algorithmen zu testen, und listet die Ergebnisse dieser Algorithmen in einer Tabelle nach auswählbaren Kriterien auf. Für Satellitendaten steht das ISPRS Stereobenchmark¹⁷, welches von REINARTZ ET AL. (2010) speziell für Benchmarks von Algorithmen zur Stereorekonstruktion für Satellitendaten konzipiert wurde bereit, und bietet ebenso verschiedene Testdatensätze und eine Ground Truth in Form eines Lidar-Oberflächenmodells an. Bezüglich dieses Benchmarks wurden bereits Analysen verschiedener Matchingkosten und Algorithmen durchgeführt (D'ANGELO & REINARTZ, 2011), die am Ende dieses Kapitels noch beschrieben werden. SZELISKI & SCHARSTEIN erwähnen in einer Erklärung ihres Benchmarks, dass die Auflistung nicht primär als Rangliste gelten soll, denn es könne nicht kontrolliert werden, wie stark die Teilnehmer des Benchmarks „Parameter Tuning“¹⁸ vornähmen.

Inhalt des Kapitels

Grundlegende Techniken, um Tiefeninformationen aus zwei Bildern zu extrahieren, sollen in den folgenden Kapiteln schrittweise erläutert werden. Zusätzlich soll dabei auf Varianten und Verbesserungen verwiesen werden, die oftmals implementiert werden, um Algorithmen verschiedene positive Eigenschaften zu geben.

Dabei werden als erstes auf die Stereogeometrie und auf die dabei nötigen Schritte erläutert. Anschließend sollen Ähnlichkeitsmaße erläutert werden, wobei besonders auf die in dieser Arbeit eingesetzten Maße Wert gelegt werden soll. In allen Kapiteln soll dabei besonders im Vordergrund stehen, eine Parallele zu den Techniken zu schaffen, die in der Prozessierung photogrammetrischer Daten verwendet werden. Schließlich wird auf die Technik „Semi-global Matching“ eingegangen werden, mit der die in dieser Arbeit erzeugten Höhenmodelle berechnet wurden.

3.1 Grundlegende Modelle und Techniken

In den letzten Kapiteln (2.1, 2.2) wurde bereits gezeigt, in welchen Winkeln Satelliten angeordnet sein können, um Aufnahmen zu tätigen. Die Stereogeometrie vermittelt das grundlegende Prinzip der Rekonstruktion von Tiefeninformationen aus Stereobildern. In diesem Kapitel wird auch auf verschiedene Möglichkeiten und Arten und Techniken des Matching eingegangen.

3.1.1 Stereogeometrie

Um die Tiefe eines Punktes in beiden Bildern rekonstruieren zu können, wird für die Rekonstruktion die Disparität d , also der Lageunterschied zweier identischer Punkte gemessen. Aus der Disparität der

¹⁵ Das Middlebury Stereo Benchmark: <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval/> (Aufgerufen 2.4.2014)

¹⁶ Ein Ground Truth Datensatz stellt eine optimale Referenz für einen Datensatz oder Teile davon dar.

¹⁷ Das ISPRS Stereobenchmark: <http://www2.isprs.org/commissions/comm1/wg4/benchmark-test.html> (Aufgerufen 4.4.2014)

¹⁸ Parameter Tuning bedeutet in diesem Fall die Anpassung der Parameter, beispielsweise durch eine Sensitivitätsanalyse, um bezogen auf explizit diese Testdaten bessere Ergebnisse zu erreichen.

korrespondierenden Punkte und aus den Kameraparametern bzw. einer Transformationsfunktion kann ein Tiefenwert bzw. Höhenwert rekonstruiert werden. Die Disparitäten werden in einem sogenannten Disparitätsbild gespeichert, welches anschließend für die Rekonstruktion von Höhenwerten auf Grundlage geometrischer Beziehungen verwendet wird. Da jedoch nicht auf einfache Weise festgestellt werden kann, welcher Punkt in Bild I_1 dem gleichen Punkt in Bild I_2 entspricht, müssen korrespondierende Punkte gefunden werden. Diese Suche nach korrespondierenden Punkten kann sehr komplex sein und wird deshalb auch Korrespondenzproblem genannt. Den Prozess zur Lösung dieses Problems nennt man Matching. Ein Stereomatching, bei welchem das aufgenommene Objekt durch zwei kalibrierte Kameras erfasst wird, kann durch die Epipolargeometrie gut erläutert und vereinfacht werden.

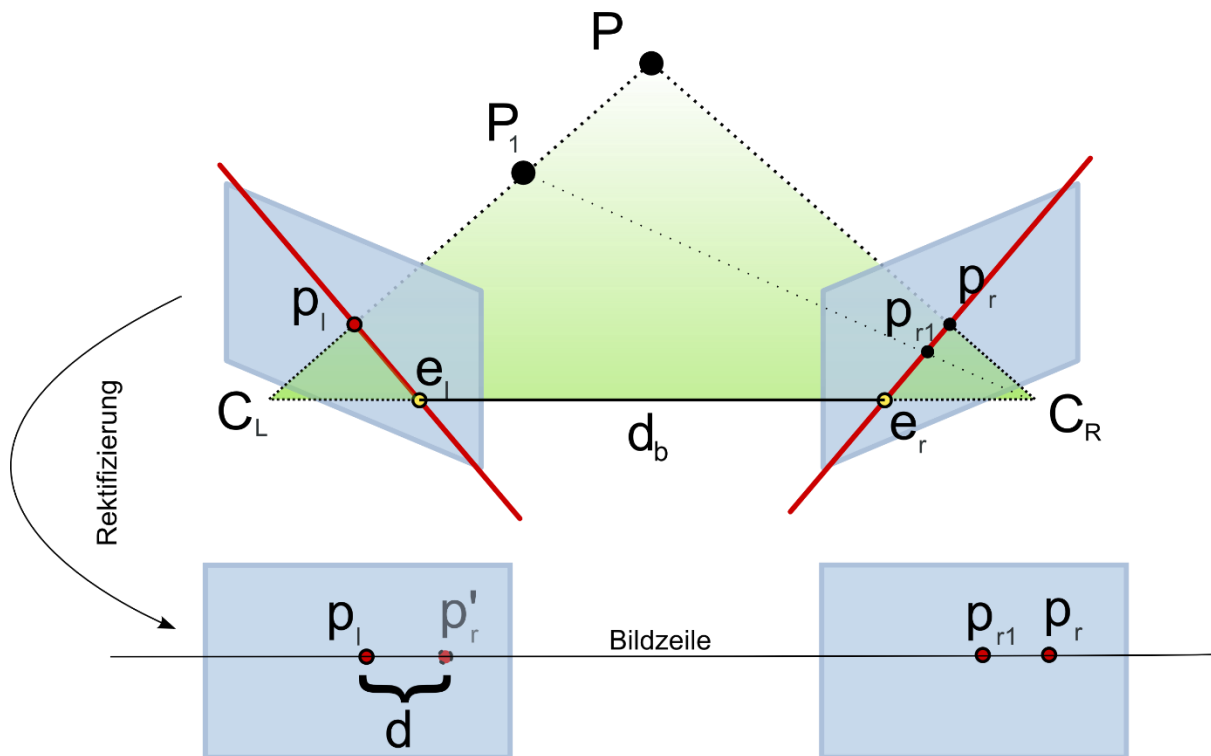


Abbildung 14: Übersicht der Epipolargeometrie

C_R, C_L : Projektionszentren, p_l, p_r korrespondierende Bildpunkte, e_l, e_r : Epipole P_1, P : Punkte im Weltkoordinatensystem, d_b : Basislinie, p_{r1} : Möglicher Korrespondierender Bildpunkt, d : Disparität

Der Vorteil der Epipolargeometrie ist der, dass korrespondierende Bildpunkte p_l und p_r in der jeweils gleichen Zeile der Bilder gesucht werden können (Epipolar Constraint). Diese Bildzeile wird auch Epipolarlinie genannt. Die Epipolarlinie wird durch einen Schnitt der Epipolarebene mit den Bildebenen der Bilder erzeugt (in Abbildung 14 rot dargestellt). Sie wird sowohl durch die Basislinie (in Abbildung 15, Basislinie B), welche die Projektionszentren C_L und C_R verbindet und die Bildebenen in den Epipolen e_l und e_r schneidet, als auch mit Hilfe der Strahlen, welche von einem Objekt zum Projektionszentrum führen, aufgespannt. Voraussetzung dafür ist, dass die Bilder rektifiziert sind. Rektifizierte Bilder befinden sich in der sogenannten rektifizierten Standardstereogeometrie (SZELISKI, 2011). Die Beziehung zwischen Disparität d , Brennweite f , Basislinie d_b und 3D-Tiefeninformation Z beschreibt folgender Zusammenhang kongruenter Dreiecke in der rektifizierten Standardstereogeometrie:

$$\Delta(P, C_r, C_l) \equiv \Delta(p_l, P, p_r)$$

Woraus folgt

$$\frac{p_r - p_l}{Z - f_k} = \frac{d_b}{Z} \quad (5)$$

und für $x_l := p_l$ und $x_r := d_b - p_l$; $d = x_l - x_r$

$$\frac{d_b + d}{Z - f_k} = \frac{d_b}{Z} \quad (6)$$

bzw. nach Z aufgelöst folgender Zusammenhang:

$$Z = f_k * \frac{d_b}{d}$$

bzw. für X , Y und d :

$$X = \frac{d_b * x_l}{d}$$

$$Y = \frac{d_b * y_l}{d}$$

$$d = f_k * \frac{d_b}{Z}$$

Korrespondierende Punkte sind also nur in x -Richtung um die Disparität d verschoben ($X = x - d$; $Y = y$). Eine ausführliche Erklärung bezüglich der Zusammenhänge in Epipolarbildern bei Satellitendaten kann in der Dissertation von MICHEL MORGAN (2004) gefunden werden. SZELISKI (2011) beschreibt in seinem Werk „Computer Vision Algorithms and Applications“ auch das Disparity Space Image (DSI). Im $DSI = (x, y, d)$ können temporär die Matchingkosten zweier korrespondierender Bildzeilen gespeichert werden, damit später ein optimaler Pfad durch dieses Bild gefunden werden kann. In seiner Dissertation beschreibt MORGAN (2004) unter anderem, dass Epipolarlinien von eingesetzten Framekameras einer geraden Linie entsprechen. Anders äußern sich, abhängig vom verwendeten Sensormodell, Epipolarlinien von Zeilenscannern. Da jede Zeile eine eigene Abbildung ist und in unterschiedlichen Winkeln aufgenommen wurde, führt dies zu Epipolarlinien, welche die Charakteristik einer Kurve besitzen (HIRSCHMÜLLER, 2008). Jede einzelne Bildzeile hat also ihre eigene externe Orientierung, wie in 2.1.2 bereits erwähnt wurde. Da keine strenge Stereo-Rektifizierung von Bildern aus Push-Broom Sensoren möglich ist, kann entweder eine Approximation (MORGAN, 2004) verwendet werden, welche für VHR Daten nur auf kleinen Bildausschnitten gültig ist, oder die gekrümmten Epipolarlinien können direkt verfolgt werden.

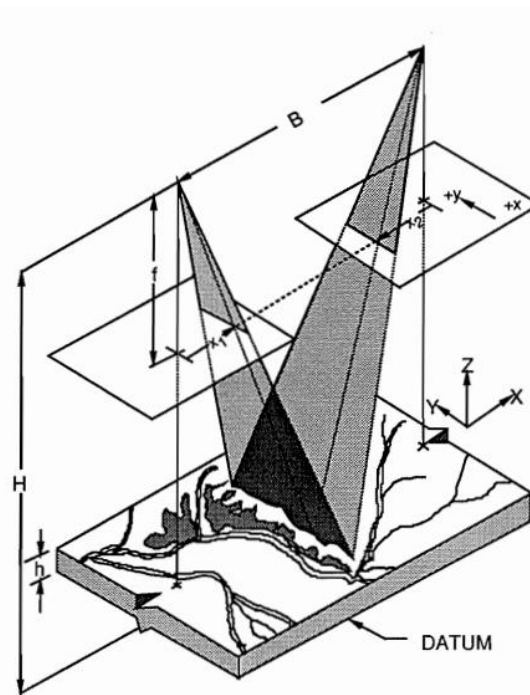


Abbildung 15: Epipolargeometrie bei Aufnahmen aus der Luft oder dem Weltall
Abbildung aus CAIN, 1989

3.1.2 Stereorekonstruktion

Für die Rekonstruktion bzw. für das Matching unterscheidet man zwei verschiedene Techniken: Die dünne und die dichte Rekonstruktion. Bei der dünnen Rekonstruktion werden besonders markante Features, beispielsweise durch Operatoren wie den Harris oder Canny Edge Detector, SIFT, SURF oder durch Featuredetektoren wie den Foerstner Interest Operator oder den Movarec Operator, in einem Bild gesucht. Anschließend wird (innerhalb eines räumlich begrenzten Suchraumes) im jeweils anderen Bild mit dem verwendeten Operator nach diesen Features gesucht. Damit lassen sich nur Features, welche vom jeweilig verwendeten Detektor gefunden wurden, rekonstruieren. Die übrigen Bildinhalte können durch Interpolation berechnet werden. Die dünne Rekonstruktion wird zur Erstellung von Höhenmodellen nicht verwendet, da ansonsten zu wenige Höheninformationen rekonstruiert werden könnten. Sie wird primär für Anwendungen mit niedrig auflösenden Bildern und echtzeitnahen Anforderungen verwendet. So kommt sie beispielsweise oft für Umgebungserkennung in Fahrzeugassistenzsystemen zum Einsatz. Die dichte Rekonstruktion ist weitaus aufwendiger, da für jeden Teil des Bildes versucht werden muss, korrespondierende Bildpunkte im jeweils anderen Bild zu finden. Dies ist besonders, wie SZELISKI (2011) unter anderem erwähnt, in texturarmen Gebieten schwierig. SCHARSTEIN UND SZELISKI (2002) teilen in ihrem Paper „A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Correspondence Algorithms“ den Ablauf von dichten Stereo-Korrespondenzalgorithmen in vier Schritte ein:

1. Berechnung der Matchingkosten

Mit Hilfe eines festgelegten Ähnlichkeitsmaßes werden die Matchingkosten berechnet. Für viele Algorithmen fällt dieser Schritt mit dem Schritt Nummer 2 zusammen.

2. Kostenaggregation

In den meisten Fällen wird eine sogenannte Support Region definiert, in welcher dann die Matchingkosten aggregiert werden. In vielen Fällen wird dafür ein festgelegter Kernel verwendet. Im Falle globaler Algorithmen fallen Schritt 2 und 3 zusammen.

3. Disparitätsberechnung und Optimierung

Es wird eine Disparität für jeden Bildpunkt ausgewählt, die eine festgelegte Kostenfunktion minimiert. Es kann dabei beispielsweise ein minimaler Pfad durch ein zweidimensionales Disparitätsbild gesucht werden. Bei globalen Algorithmen wird versucht, eine Kostenfunktion zu finden, welche aus einem Datenterm (einer Matchingkostenberechnung) und einem smoothness-Term (Glattheitsterm¹⁹) besteht, eine Disparitätszuweisung findet, welche eine Energiefunktion minimiert (Siehe Kapitel 3.2.1)

4. Disparitätsverbesserung

Im letzten Schritt wird versucht, Disparitäten mit Hilfe von Postprocessingtechniken zu verbessern. Dazu zählt zum Beispiel eine Ausreißersuche, eine Filterung oder ein sog. left-right consistency Check, bei dem Verdeckungen gesucht werden.

Wie in der Einteilung erwähnt, unterscheidet man zwischen lokalen und globalen Methoden. Der Hauptunterschied dieser beiden Methoden besteht darin, dass lokale Methoden meist versuchen, ihre Matchingkosten über eine sog. Support Region im Disparitätsbild zu aggregieren. Globale Methoden versuchen hingegen über den gesamten Bildbereich eine Disparität zu finden, die für eine bestimmte Bedingung die Kosten minimiert. Der Hauptunterschied dieser globalen Methoden ist die Implementierung, mit der diese Kosten minimiert werden.

Lokale Methoden

Die einfachste lokale Methode, die Matchingkosten zu berechnen, ist die pixelweise Berechnung der absoluten Unterschiede (absolute intensity difference), bei der sich die Matchingkosten als absoluter Grauwertunterschied zweier verglichener Pixel ausdrücken lässt.

Die Matchingkosten eines Pixels x, y an der Disparität d sind dabei:

$$|I_l(x, y) - I_r(x + d, y)| \quad (7)$$

Berechnet man diese absoluten Unterschiede für alle Disparitäten, ergibt sich eine Reihe von Matchingkosten und zugehörigen Disparitäten für diesen Pixel.

¹⁹ Freie Übersetzung des Autors

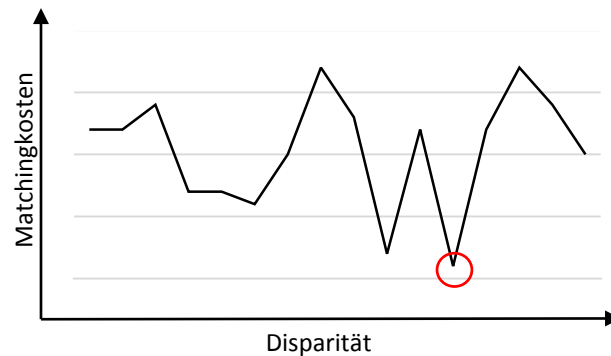


Abbildung 16: Verlauf der Matchingkosten an der entsprechenden Disparitätsposition

Durch Auswahl der Disparität mit den minimalen Kosten erhält man für die oben erwähnte Berechnung für alle Pixel eines Bildes eine Disparitätskarte, die ein sehr großes Rauschen aufweist. Das Rauschen wird durch Mehrdeutigkeiten verursacht, die durch ähnliche Grauwerte einzelner Pixel verursacht werden. Um diesen Effekt zu minimieren, werden die Kosten bei lokalen Methoden aggregiert. Es wird dazu ein zweidimensionaler Kernel eines bestimmten Ausmaßes (j, k) um den jeweiligen Pixel gelegt, damit die Kosten innerhalb der Umgebung des Kernels miteinbezogen werden. Anschließend können die Kosten zum Beispiel mit der WTA-Methode, der „Winner takes all“ Methode, bei welcher die minimalen Kosten bestimmt werden, für alle Pixel im Bild ausgewählt werden. Es gibt für manche lokale Algorithmen auch die Möglichkeit, den Schritt der Kostenberechnung und Aggregation in einem Schritt durchzuführen.

$$\sum_{(j,k)} |I_l(x, y) - I_r(x + d, y)|$$

Für lokale Methoden existiert ein breites Spektrum an Ähnlichkeitsmaßen und Techniken, um die Ähnlichkeiten zu berechnen. Auf verschiedene Ähnlichkeitsmaße soll im nächsten Kapitel eingegangen werden.

Das Disparity Space Image (DSI)

In Abbildung 17 wird der Verlauf der Matchingkosten an verschiedenen Disparitätspositionen gezeigt. Diese Darstellung kann als zweidimensionales Bild dargestellt werden, in der man die zwei Bildzeilen im rechten und linken Bild als x bzw. y Achse mit den jeweiligen Matchingkosten an den korrespondierenden Positionen aufträgt. Somit ergibt sich für jede Bildzeile y ein zweidimensionales Disparity Space Image (DSI) (x, d) . Es besitzt dabei die Kantenlänge einer gesamten Bildzeile. Um die Größe des DSI einzuschränken werden oft eine maximale und eine minimale Disparität festgelegt, damit der Suchraum verkleinert wird, und nicht plausible Disparitäten ausgeschlossen werden. Das resultierende, nicht mehr quadratische sondern rechteckige DSI ist nun deutlich schmaler, jedoch immer noch so lang wie eine Bildzeile. Es gibt zahlreiche Techniken, einen optimalen Pfad durch dieses DSI zu finden und somit unerwünschte Effekte zu unterdrücken. Diese Techniken werden durch die sogenannte dynamische Programmierung umgesetzt und zählen zu den globalen Optimierungstechniken. Das DSI hat dabei für alle Bildzeilen eine Dimension von x, y, d (SZELISKI (2011) S. 473). Abbildung 20 veranschaulicht diesen Raum sehr gut und zeigt in roter Markierung eine für dieses Beispiel optimale Disparitätszuweisung (in Abbildung 20 für verschiedene Pyramidenstufen) an. Im DSI selbst kann dabei durch verschiedenste Algorithmen untersucht werden, ob und wo Verdeckungen und Verletzungen der sog. Ordering Constraint auftreten. Die Ordering Constraint

besagt, dass die Reihenfolge von Objekten in den Bildern gleich sein muss. Es treten oft Verletzungen der Ordering Constraint auf, die zum Beispiel durch foreshortening²⁰ Effekte verursacht werden (COX & RAO, 1996). Nachteil der Implementierungen der zeilenbasierten Algorithmen durch dynamische Programmierung sind häufig auftretende Streifeneffekte (HIRSCHMÜLLER, 2008), die durch die zeilenweise Minimierung der Kosten auftreten. Folgende Abbildung aus Szeliskis Werk zeigt ein solches DSI einer Bildzeile. In Abbildung 17 (unten) wird ein Bild dargestellt, welches einen Ausschnitt (der durch minimale und maximale Disparität begrenzt wurde) eines DSI zeigt.

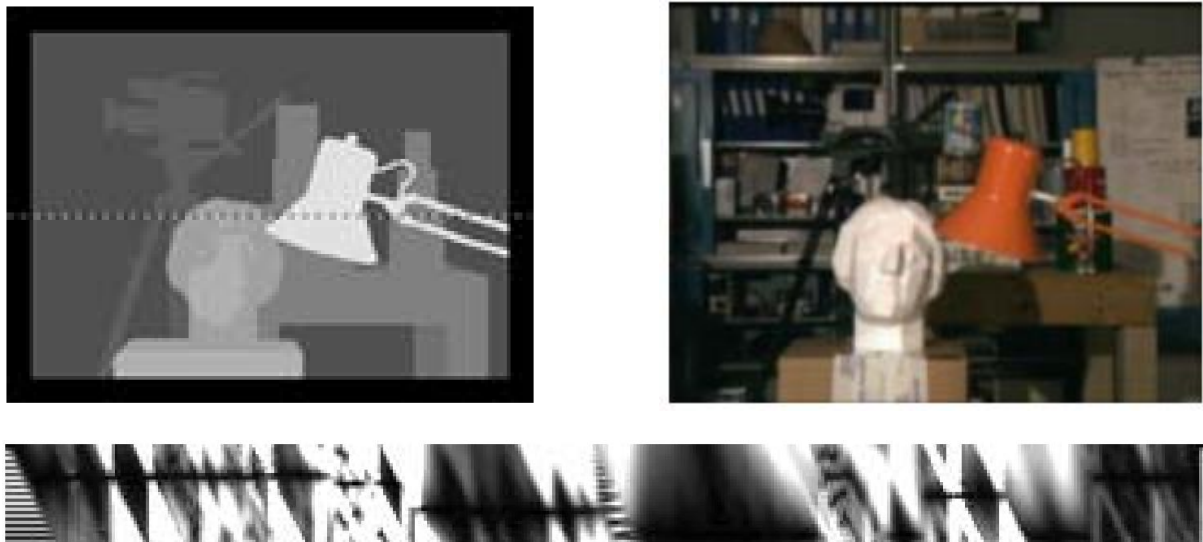


Abbildung 17: Disparitätsbild

Links: Soll-Disparitäten

Rechts: eine Aufnahme für die Rekonstruktion,

Unten: Disparitätsbild (Ausschnitt einer Zeile, im linken Bild markiert)

Abbildungen aus SZELISKI, 2011

Support Regionen

Es kann durch verschiedenste Variationen der Kernelgröße der Support Region das Signal zu Rauschverhältnis (SNR) angepasst oder die Wahrscheinlichkeit, fehlerhafte Ähnlichkeitsannahmen zu treffen, minimiert bzw. maximiert werden. Andere Möglichkeiten sind zum Beispiel die feinere Aufteilung der Disparitätsabstände oder die Approximation einer Kurve für die Minimierung, um feinere (subpixelgroße) Disparitätsabstufungen zu erhalten. Auch die Gewichtung, die Form, die Dimension oder Berechnung der Support Region kann aus vielen dokumentierten Methoden gewählt werden. Folgende Techniken existieren für Variationen der Support Regionen

²⁰ Foreshortening tritt auf, wenn sich ein Objekt im Vordergrund näher an einer der beiden Kameras befindet als an der anderen Kamera. Dadurch schiebt sich das Objekt in einer Bildzeile vor Objekte, welche in der korrespondierenden Bildzeile eigentlich nach dem Objekt auftreten würden.

(Liste: Auszug nach SZELISKI, 2011):

- Zweidimensionale Support Region (für überwiegend waagrechte Oberflächen)
 - Quadratische Kernel
 - Gaußsche Konvolutionskernel
 - Mehrere Kernel an unterschiedlichen Ankerpunkten
 - Adaptive Kernel
 - uvm.
- Dreidimensionale Support Regionen (für schräge Oberflächen)
 - Limitierte Disparitätsdifferenz
 - Limitierter Disparitätsgradient
 - Plausibilisierung von Verdeckungen
 - uvm.

Einige dieser Techniken vermindern verschiedene Effekte, welche durch klassische quadratische Support Regionen hervorgerufen werden, wie beispielsweise Fehler an Diskontinuitäten der Disparität, nicht-planare Oberflächen, texturarme Gebiete. Da jedoch unmöglich die Mehrzahl dieser Effekte ausgeschlossen werden können, werden globale Methoden verwendet, welche viele dieser Effekte verhindern können.

Globale Methoden und Optimierung

Globale Methoden versuchen eine optimale Disparität zu finden, die sowohl von den lokalen Matchingkosten als auch von einer globalen Glattheitsbedingung, welche bestimmte Disparitätsvariationen mit festgelegten Gewichten bestraft, abhängt. Dabei verzichten globale Methoden darauf, berechnete Kosten zu aggregieren, sondern bewerkstelligen dies über die Glattheitsbedingung.

Das sogenannte Rucksackproblem ist ein gutes Beispiel dafür, solche Optimierungsprobleme besser verstehen zu können. Dabei geht es darum, aus einer Menge von Gegenständen mit verschiedenen Gewichten und unterschiedlichen Nutzwerten eine Teilmenge auszuwählen, welche das zulässige Gesamtgewicht des Rucksacks nicht übersteigt. Gleichzeitig soll jedoch ein maximaler Nutzen aus den Gegenständen, welche in den Rucksack gepackt wurden, gezogen werden.

Im Falle globaler Optimierungen in Stereokorrespondenzalgorithmen wird dabei die gesuchte Disparität so regularisiert, so dass bestimmte Arten von Disparitätsentwicklungen mit hohen Kosten verbunden sind. Ein Beispiel für Regularisierung ist, dass es für ein Problem, beispielsweise für eine Einpassung (fitting) einer Kurve auf gegebene Stützpunkte, keine harten Grenzen gibt und die Kurve nicht zwingend die Punkte schneiden muss (BIRCHFIELD & TOMASI, 1999). Deshalb wird je nach Gewichtung λ eine Anpassung, welche die Verletzung dieser Punkte mit einer sogenannten Smoothness-Bedingung anpasst, berechnet. Bei stärkeren Gewichtungen der Smoothness-Bedingung kann die Kurve beispielsweise zu Gunsten der Glattheit weiter von den vorgegebenen Punkten abweichen.

Die Formulierung eines solchen Problems lässt sich mit Energiefunktionalen ausdrücken, deren Ziel es ist, eine Lösung d zu finden, die eine globale Energie $E(d)$ minimiert (SZELISKI 2011). Das Funktional (13) ist dabei in einen sogenannten Datenterm $E_d(d)$ und einen Smoothnessterm $E_s(d)$ aufgeteilt. Der Datenterm kann, im Falle der globalen Methoden, für die Lösung des Korrespondenzproblems ein

Ähnlichkeitsmaß sein, so zum Beispiel der oben erwähnte absolute Intensitätsabstand. Der Smoothnessterm kann, wie im Falle von Semi-global Matching, auf welches später eingegangen wird, aus mehreren Einzeltermen bestehen. Er reguliert die Disparität so, dass Disparitätssprünge möglichst vermieden werden.

$$E(d) = E_d(d) + \lambda E_s(d) \quad (8)$$

Mit den Einzeltermen

$$E_d(d) = \sum_{x,y} C(x, y, d(x, y))$$

und

$$E_s(d) = \sum_{x,y} \rho(d(x, y) - d(x + 1, y)) + \rho(d(x, y) - d(x, y + 1))$$

Der Datenterm $E_d(d)$ ist dabei ein Term, der die Güte der Disparitätsfunktion ρ im Disparitätsbild, das mit Hilfe eines Ähnlichkeitsmaßes entstanden ist, misst (SZELISKI, 2011).

$E_s(d)$ beschreibt die Glattheitsanforderung an die Lösung. Im Beispiel der oberhalb gezeigten Formulierung von $E_s(d)$ (SZELISKI, 2011) wird als vereinfachtes Beispiel jeweils nur die Differenz der Disparitäten der benachbarten Pixel betrachtet. Nach SZELISKI (2011) ist die Funktion ρ in diesem Fall eine monoton steigende Funktion bezüglich der Disparitätsdifferenz (SZELISKI, 2011). ρ ist in der Regularisierung normalerweise eine quadratische Funktion. Dies würde dazu führen, dass das resultierende Modell im Gesamten gleichbleibend sehr glatt wäre. Um Objektgrenzen so gut wie möglich zu erhalten, existieren mittlerweile zahlreiche Implementierungen (VEKSLER & ZABIH, 2001; HIRSCHMÜLLER, 2008), welche robuste Funktionen für ρ benutzen, um so Diskontinuitäten zu erhalten. Eine separat zu behandelnde Gruppe innerhalb der globalen Optimierung stellt nach SZELISKI (2011) die globale Optimierung mit Hilfe dynamischer Programmierung dar, wie sie im Teil „lokale Methoden“ bereits kurz erwähnt wurde. Zahlreiche Verfahren existieren, die eine näherungsweise minimale Lösung einer Energiefunktion $E(d)$ in einer verhältnismäßig kurzen Zeit finden können. Fast alle Verfahren finden nur eine Näherung und nicht das globale Optimum, insbesondere solche mit robusten Smoothnessterm, der auch Diskontinuitäten zulässt. Im Kapitel Semi-global Matching soll eine Technik vorgestellt werden, welche keine optimale Disparität über das gesamte Bild findet, sondern entlang von 8 bzw. 16 eindimensionalen Linien im Bild eine passende Disparität finden kann und damit Prozessierungszeit einspart.

Zusätzliche Verbesserungsmöglichkeiten für Stereorekonstruktionsalgorithmen

Da viele Algorithmen, besonders in der Fernerkundung, auf Grund der Satellitenbilder mit sehr großen Bildern arbeiten, gibt es für die Verbesserung der Laufzeit zwei verbreitete Möglichkeiten.

Die erste Möglichkeit besteht darin, das Bild in gleich große Teile mit einem Überlappungsbereich aufzuteilen und anschließend die korrespondierenden Ausschnitte in den beiden Bildern separat zu prozessieren. Diese Aufteilung birgt auch die Möglichkeit einer Parallelprozessierung oder eines load balancing²¹ innerhalb eines Clusters, was wiederum die Prozessierungsgeschwindigkeit positiv

²¹ Load balancing ist eine Technik, um Rechenlasten gleichmäßig über Computer innerhalb eines Netzwerks zu verteilen.

beeinflusst. Die berechneten Bildausschnitte können dann nach der Disparitätszuweisung wieder aneinandergelängt werden. Sind die Bildausschnitte zu klein gewählt, können Artefakte auftreten, da sonst nicht genug Information für das Auffinden einer passenden Disparität vorhanden ist. Die zweite, in der Computervision sehr verbreitete Methode ist das hierarchische Matching auf Bildpyramiden²². Dabei wird bei der Bildpyramide mit der geringsten Auflösung mit dem Matching begonnen, um eine erste Einschränkung für die gesuchte Disparität zu finden. Anschließend wird dieses Verfahren sukzessive mit höher aufgelösten Versionen des Bildes fortgeführt, damit der Disparitätsbereich für die spätere Suche auf den Bildern mit der vollen Auflösung bereits sehr weit eingeschränkt wird, und dadurch nicht mehr so rechenintensiv ist.

3.2 Spezielle Methoden und Maße

Das Ergebnis einer Korrespondenzsuche ist direkt abhängig von den verwendeten Ähnlichkeitsmaßen. Dazu werden im Folgenden eine Reihe von Ähnlichkeitsmaßen vorgestellt, welche in der Rekonstruktion von Höhenmodellen aus Satellitendaten oft eingesetzt werden. Zusätzlich wird auf die Technik Semi-global Matching eingegangen, mit welcher auch die in dieser Arbeit vorgestellten Testgebiete verarbeitet wurden.

3.2.1 Ähnlichkeitsmaße

Für die Messung der Ähnlichkeit zweier Bildausschnitte existieren zahlreiche Maße, welche für verschiedene Anwendungszwecke eingesetzt werden und robust gegenüber unterschiedlichen Effekten sind. HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) untersuchen in ihrem Paper „Evaluation of Cost Functions for Stereomatching“ einige ausgewählte Ähnlichkeitsmaße mit Hilfe von Testdatensätzen mit zugehöriger Ground Truth. Dabei benutzen sie zur Evaluation dieser Maße sowohl lokale (lokaler Ansatz mit einem 9 x 9 Aggregationskernel mit einer WTA Disparitätsauswahl) als auch globale Verfahren (ein auf Graph-Cuts basierendes Verfahren²³) sowie Semi-global Matching (HIRSCHMÜLLER (2008), mit konstanter Parametrisierung). Besonderen Wert legen sie dabei auf die Sensitivität dieser Maße gegenüber global und lokal auftretenden Helligkeitsunterschieden, sowie auf das Ergebnis bei rauschbehafteten Bildern. HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) gehen dabei nur auf Ähnlichkeitsmaße ein, welche auf praxisnahen Testdaten mit komplexen oder unbekannten Lichtverhältnissen funktionieren, wie es zum Beispiel bei Satellitendaten gegeben ist. In diesem Abschnitt soll kurz auf die Funktionsweise dieser verschiedenen Ähnlichkeitsmaße, sowie auf das Ergebnis, zu welchem HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) in ihrer Evaluation kommen, eingegangen werden. Folgende Ähnlichkeitsmaße werden aus insgesamt 15 Kostenfunktionen in der Evaluation untersucht und sollen im Folgenden kurz erläutert werden:

- Absolute Differenz (AD bzw. in der aggregierten, in lokalen Techniken gebräuchlicheren Form: Summe der absoluten Differenz (SAD))
- Hierarchisches Mutual-Information (HMI)
- Normalisierte Kreuzkorrelation (NCC)
- Census Transformation

²² Bildpyramiden stellen mehrere gesampelte Versionen geringerer Auflösung eines Bildes bereit.

²³ Verfahren vorgestellt in VEKSLER & ZABIH, 2001

Die Parametrisierung der Algorithmen wird durch Parametertuning auf separaten Testdatensätzen, welche kaum radiometrische Variationen oder unterschiedliche Beleuchtungssituationen zeigen, durchgeführt. Anschließend werden dazu neue Testdatensätze entwickelt, welche unterschiedliche radiometrische Effekte und verschiedene Beleuchtungssituationen zeigen. Diese werden durch ein speziell entwickeltes Verfahren der hochgenauen Tiefenmessung mit Hilfe von projizierten Lichtstreifen mit Ground Truth Referenzen versehen (SCHARSTEIN & SZELISKI, 2003). Zusätzlich werden Testdatensätze durch das Hinzufügen von synthetischen Effekten, wie Rauschen, Vignettierungseffekte oder globale sowie lokale radiometrische Veränderungen überprüft. HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) bewerteten die resultierenden Tiefenbilder ab einer Disparitätsabweichung von „Eins“ zur Ground Truth, mit der Anzahl dieser abweichenden Pixel als quantitatives Maß. Besonders auffällig an den Ergebnissen ist, dass sich der Großteil aller Fehler in der Nähe von Disparitätsdiskontinuitäten befindet.

In den Ergebnissen der Gruppe ohne synthetische Effekte stellte sich SAD in der Testreihe der fensterbasierten bzw. lokalen Maße als schlechtestes Maß heraus, während NCC und HMI ähnliche Ergebnisse liefern. Am besten schneiden dabei Rank und im Besonderen Census ab. In der globalen Methode (Graph Cut (GC)) und dem SGM treten Census und HMI als sehr gute Maße auf, während sich die Kostenberechnung der absoluten Abweichung in diesen beiden Techniken als weniger gut zeigt. Die Rank Kostenberechnung führt im SGM Fall zu schlechten und im GC Fall zu mäßigen Ergebnissen.

Die Ergebnisse in der Gruppe mit synthetischen Effekten fallen bei Testbildern mit radiometrischen Unterschieden der zwei Bilder besonders auf, indem die Fehler der absoluten Differenz bzw. der SAD stark ansteigen. Dieser Effekt tritt dadurch auf, dass sich die Differenz der absoluten Intensitätswerte durch Helligkeitsunterschiede stark unterscheidet, und die absolute Differenz bzw. die SAD gegenüber radiometrischen Veränderungen stark abhängig macht. NCC zeigt dagegen eine stärkere Robustheit gegenüber radiometrischen Veränderungen. HMI weist besonders in Bildern, welche durch ein synthetisches Rauschen kontaminiert wurden, sehr gute Ergebnisse auf. Bei Bildern mit lokalen radiometrischen Veränderungen zeigt sich HMI weniger stabil, während die Census Kostenfunktion in allen Fällen sehr robuste und gute Ergebnisse erreicht. HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) erwähnen explizit die Robustheit der Census Kostenfunktion, die sich an Diskontinuitäten der Disparität und Ausreißern zeigt.

Absolute Differenz bzw. Summe der absoluten Differenzen

Die Kosten für die absolute Differenz bzw. die SAD, welche abhängig von der Nachbarschaft N_p mit der Menge an q Pixeln und den Intensitäten im linken und rechten Bild I_L, I_R sind, werden in folgender Form definiert. Sie gehören, wie die NCC, den sog. parametrisierten Matchingkosten (HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN, 2007) an.

$$C_{AD}(p, d) = |I_L(p) - I_R(p - d)|$$

$$C_{SAD}(p, d) = \sum_{q \in N_p} |I_L(q) - I_R(q - d)|$$

Normalisierte Kreuzkorrelation (NCC)

NCC ist stark abhängig von Intensitätsveränderungen in den Bildern und dadurch sehr anfällig für Ausreißer. Es existieren Varianten der normalisierten Kreuzkorrelation, wie etwa die zero-mean

normalized cross-correlation, welche nach HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) robuster als NCC ist. NCC wird folgendermaßen definiert (Notation verändert, nach LEWIS, 1995):

$$C_{NCC}(p, d) = \frac{\sum_{q \in N_p} I_L(q) * I_R(q - d)}{\sqrt{\sum_{q \in N_p} I_L(q)^2 * \sum_{q \in N_p} I_R(q - d)^2}}$$

Hierarchisches Mutual Information (HMI)

Mutual Information bzw. HMI (VIOLA & WELLS, 1997; HIRSCHMÜLLER, 2005) führt eine Matchingkostenberechnung auf Grundlage der Entropie H zweier Bilder I_1 und I_2 , sowie der gemeinsamen Entropie $H_{I_1 I_2}$ durch. Sie ist folgendermaßen in HIRSCHMÜLLER (2005) definiert:

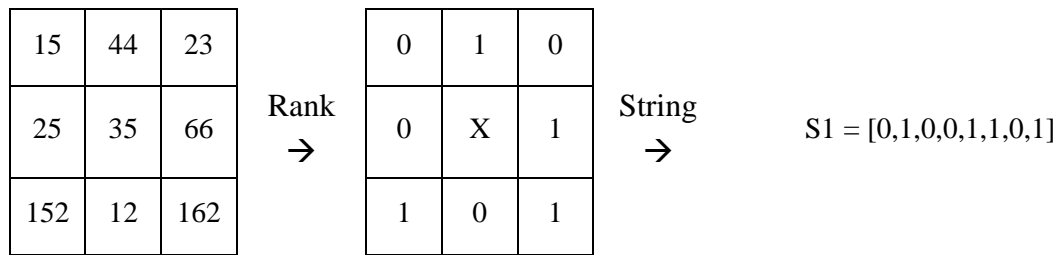
$$MI_{I_1 I_2} = H_{I_1} + H_{I_2} - H_{I_1 I_2} \quad (9)$$

Die Entropien werden dabei aus den Dichtefunktionen der Bilder berechnet (HIRSCHMÜLLER, 2005). Damit die gemeinsame Entropie der Bilder I_1 und I_2 berechnet werden kann, muss bereits eine Disparität vorhanden sein, da sonst die keine Dichtefunktion berechnet werden kann. Um dieses Problem zu lösen, kann ein hierarchischer Ansatz verwendet werden, welcher mit einer zufälligen oder durch ein anderes Ähnlichkeitsmaß geschätzten Disparität auf einem Bild niedrigerer Auflösung beginnt und sukzessive die Disparität auf Bildern höherer Auflösung verbessert. (HIRSCHMÜLLER, 2005).

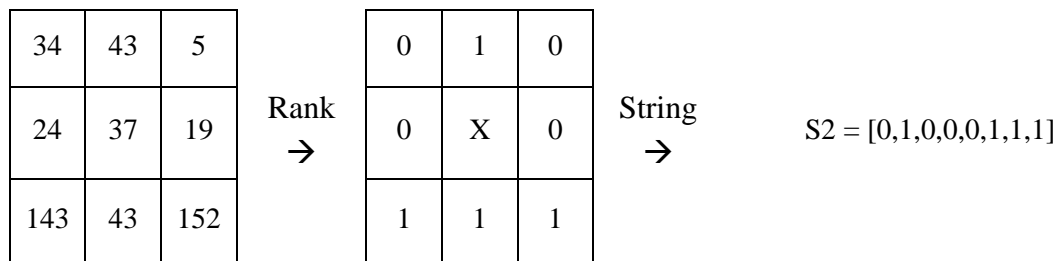
Census Transformation

Die Census Transformation gehört zu den sog. nicht-parametrischen Matchingkosten (ZABI & WOODFILL, 1996). Sie ist, wie ZABIH & WOODFILL (1996) in ihrem Paper „on parametric local transforms for computing visual correspondence“ beschreiben, sehr robust gegenüber radiometrischen Veränderungen. Für die Census Transformation wird innerhalb eines festgelegten Fensters, wie bei der Rank-Transformation, eine logische Eins für die Intensitäten, die größer als der aktuelle Zentrumspixel sind, und eine logische Null für diejenigen Intensitäten, die kleiner als der Zentrumspixel sind, in einen String eingetragen. Dies wird für die beiden momentan zu vergleichenden Pixel als Zentrum eines Kernel durchgeführt. Anschließend wird die Hamming Distanz (ZABIH & WOODFILL, 1994) der beiden Strings berechnet, welche dann als Maß für Matchingkosten verwendet wird. Folgendes Beispiel soll die Funktionsweise der Census Transformation verdeutlichen:

Fenster, Bild 1



Fenster, Bild 2



$$S1 \text{ XOR } S2 = [0,0,0,0,1,0,1,0]$$

Abbildung 18: Vorstellung des Census Ähnlichkeitsmaßes

Summiert man die Einsen erhält man die Hamming Distanz „zwei“ und damit die Kosten für diesen Iterationsschritt. In der Evaluation von HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) wird ein Kernel der Größe 9x7 verwendet. Am genannten Beispiel wird ersichtlich, dass das Maß gegenüber Ausreißern und radiometrischen Variationen der beiden Bilder eine große Robustheit aufweist.

Evaluation von Ähnlichkeitsmaßen mit SGM und Satellitendaten

ZHU ET AL. (2012) führten eine Analyse der Matchingkosten AD, HMI und Census, sowie hybrider Matchingkosten aus Census und HMI (MIC), auf verschiedenen Testdaten durch. Dazu wurden für den Nahbereich die Testdaten des Middlebury Stereo Benchmarks herangezogen. All diese Matchingkosten wurden für den Semi-global Matching Algorithmus als Kostenmaß verwendet. Als luftgestützte Testdaten wurden Datensätze verwendet, welche mit Hilfe des 3k Aufnahmesystems (KURZ, 2009) aufgenommen wurden. Für den Test der Satellitendaten wurden die in diesem Kapitel bereits erwähnten Testdaten des ISPRS matching Benchmarks (REINARTZ ET AL., 2010) eingesetzt. Die Ergebnisse bezüglich der Testdaten des Middlebury Stereo Benchmarks, welche bereits von HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN (2007) überprüft wurden, sind äquivalent. MIC schneidet fast identisch wie MI ab.

Bei den für diese Arbeit relevanteren luft- bzw. satellitengestützten Systemen erzielten die Matchingkosten folgende Ergebnisse:

ZHU ET AL. (2012) beobachteten unter anderem, dass die AD stark von der Base-to-Height Ratio (B/H) abhängt. AD zeigt gerade bei größeren B/H unbefriedigende bzw. gar keine Ergebnisse. HMI ergibt minimal bessere Ergebnisse. Census äußert sich durch eine rauschbehaftete Abbildung. Für Größere B/H erwies sich Census als robustestes Maß. MIC erzielt dabei die größte Vollständigkeit, sowie die beste Abbildung. Für die Satellitendaten erhalten ZHU ET AL. (2012) das Ergebnis, dass das robuste Maß

Census bereits gute Ergebnisse bezüglich der Vollständigkeit sowie der Abweichung zur Referenz präsentiert. Bei HMI entstehen größere Abweichungen sowie weitaus größere Bereiche, die nicht rekonstruiert werden konnten. MIC stellt sich auch hier als bestes Ähnlichkeitsmaß heraus und erreicht eine um etwa 1 % größere Vollständigkeit sowie eine minimal bessere Abweichung. MIC beinhaltet die robusten Eigenschaften der Census Kosten und die Möglichkeit, Kanten und Diskontinuitäten genauer abzubilden.

Das Ähnlichkeitsmaß MIC ist von ZHU ET AL. (2012) mit der Möglichkeit einer Gewichtung durch den Faktor w_{MI} folgendermaßen definiert:

$$C_{MIC}(p, d) = w_{MI} * C_{MI} + (1 - w_{MI}) * C_{Census}(p, d) \quad (10)$$

3.2.2 Semi-global Matching

Die Semi-global Matching Technik wurde ausgiebig von HIRSCHMÜLLER (2005) in der Arbeit „Stereo processing by Semi-global Matching and Mutual Information“ vorgestellt. Der Algorithmus lässt sich nach HIRSCHMÜLLER (2005) in folgende Schritte gliedern:

1. Pixelweise Matchingkostenberechnung
2. Kostenaggregation
3. Disparitätenberechnung

Für die Berechnung der Matchingkosten wird in HIRSCHMÜLLER (2008) unter anderem Mutual Information genannt. Es können jedoch auch andere, pixelweise Matchingkosten, wie Census, MIC oder die absolute Differenz der Intensitäten verwendet werden. Die pixelweisen Matchingkosten werden in diesem Schritt ausgerechnet und im DSI gespeichert. Anschließend wird für die Kostenaggregation die folgende Energiefunktion, welche vom Disparitätsbild D abhängig ist, minimiert:

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1]) \quad (11)$$

$$\sum_p (C(p, D_p))$$

wobei $\sum_p (C(p, D_p))$ die pixelweisen Kosten darstellt.

$$\sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1]$$

$$\sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1]$$

Die Terme mit P_1 und P_2 liefern eine Strafe (Penalty) P_1, P_2 zurück, wenn die jeweilige Bedingung T erfüllt ist. P_2 soll dabei größer oder gleich P_1 sein. Die Strafe kann, je nach gewünschter Stärke der Regularisierung, festgelegt werden. Die Strafen P_1, P_2 werden durch T dann ausgeführt, wenn weniger starke Disparitätsunterschiede bzw. starke Disparitätsunterschiede in einer Umgebung q um den Pixel p existieren. Durch den ersten Term mit P_1 werden kleine Disparitätssprünge mit P_1 bestraft. Der Term mit P_2 ist, zusätzlich von der Disparität, abhängig vom lokalen Intensitätsgradienten und bewirkt eine Bestrafung starker Disparitätsunterschiede, welche sich nicht an Orten mit starken Intensitätsunterschieden befinden. Dadurch können einerseits scharfe Kanten, als auch texturarme

Oberflächen erfolgreich rekonstruiert werden. P_2 tritt also in Kraft, wenn sich starke Disparitätsunterschiede ohne eine Veränderung des lokalen Intensitätsgradienten ergeben. Will man die Energie $E(D)$ global minimieren und die Streifeneffekte der dynamischen Programmierung in Zeilenrichtung verhindern, muss man nach einem globalen Minimum im 2D – Raum suchen. Da dies jedoch, insbesondere wenn Diskontinuitäten erhalten bleiben sollen, ein sehr komplexes Problem darstellt, werden nur Matchingkosten entlang 8 bzw. 16 eindimensionaler Pfade r , ausgehend vom aktuellen Pixel, aggregiert.

$$S(p, d) = \sum_r L_r(p, d)$$

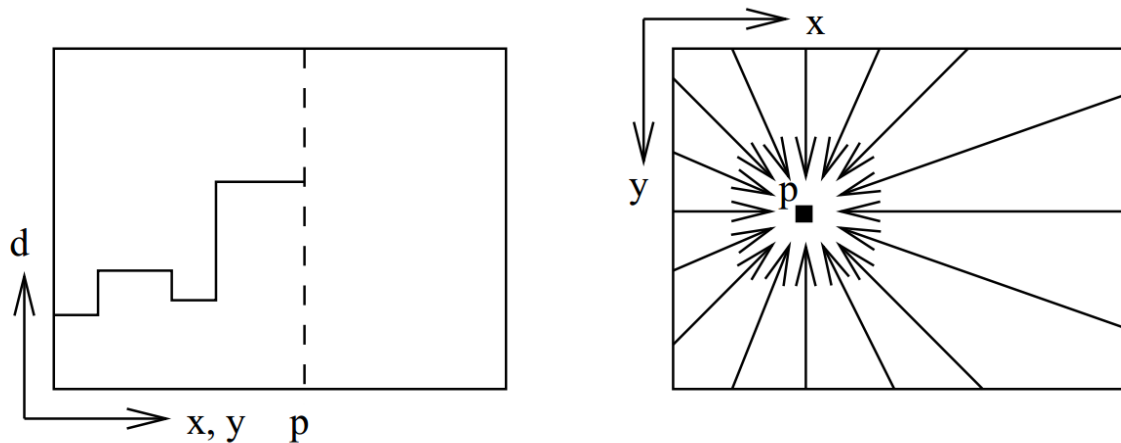


Abbildung 19: Pfade des Semi-global Matching

Links: Eindimensionaler Pfad, der bis zum aktuellen Pixel p den Pfad durch das Disparitätsbild darstellt.

Rechts: 16 Pfade, welche zum aktuellen Pixel p führen. Abbildung aus HIRSCHMÜLLER, 2008

Die Pfadkosten eines Pfades lassen sich auf folgende Weise berechnen:

$$\begin{aligned} L_r(p, d) = & C(p, d) + \min(L_r(p - r, d), \\ & L_r(p - r, d - 1) + P_1, \\ & L_r(p - r, d + 1) + P_1, \\ & \min_i L_r(p - r, i) + P_2) - \min_k L_r(p - r, k) \end{aligned}$$

In HIRSCHMÜLLER (2008) wird die Implementierung von SGM ausführlich beschrieben. Anschließend können nach HIRSCHMÜLLER (2008) in einem letzten Schritt diejenigen Disparitäten, welche sich in verdeckten Bereichen befinden, durch einen sog. „left-right consistency check“ entfernt werden.

Bei der Implementierung von SGM in dieser Arbeit wird eine hierarchische Suche in Bildpyramiden nach der besten Disparität für die Eingrenzung der Disparität in einen kleineren Bereich durchgeführt (D'ANGELO, 2010). (Abbildung 20)

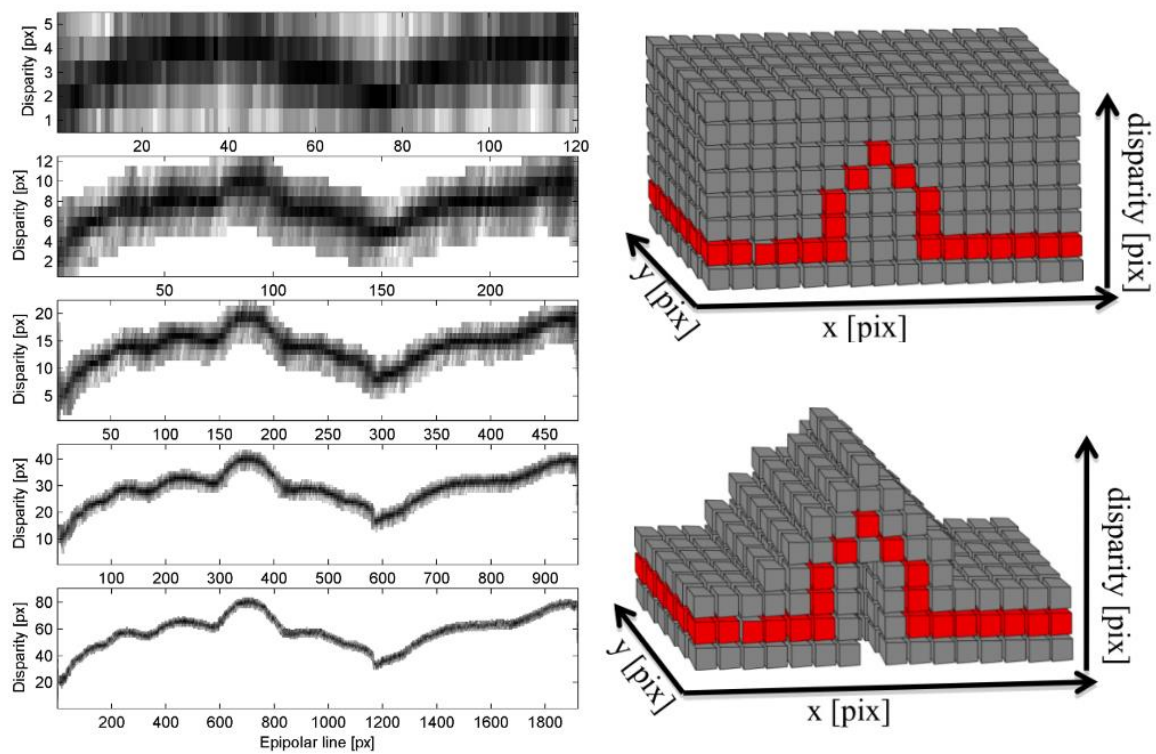


Abbildung 20: Suche von Disparitäten auf Bildpyramiden

Abbildung aus WENZEL ET AL., 2013

Einschränkung des Disparitätswerts durch Matchen auf Bildpyramiden

4 TASKINGSTRATEGIEN FÜR MULTITEMPORALE SATELLITENDATEN

Das englische Wort „task“ bzw. „to task“ bedeutet übersetzt so viel wie „Auftrag“ bzw. „etwas oder jemanden mit etwas beauftragen“²⁴. Im Kontext der Satelliten bedeutet es, einen Satellitendatenprovider damit zu beauftragen, eine Aufnahme einer AOI mit einem Satelliten durchzuführen. Nach der Vergabe eines Tasking-Auftrags an einen Satellitendatenprovider liegt es in dessen Aufgabe, möglichst schnell eine Aufnahme mit einem Satelliten zu planen – mit Rücksicht auf die Parameter, die der Auftraggeber mit dem Taskingauftrag vergeben hat. Parameter, die für eine Aufnahme bei vielen Providern angegeben werden können, sind beispielsweise der Blickwinkel des Satelliten, die Wolkenbedeckung, der Off-Nadir Winkel oder eine gewisse Zeitspanne, in der die Aufnahme durchgeführt werden soll. Intern wird für jeden Taskingvorgang eine Machbarkeitsstudie (Feasibility-study) durchgeführt und je nach Taskingauftrag an den Kunden in Form einer Aufnahmewahrscheinlichkeit weitergegeben.

Feasibility

Die Feasibility-study wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Für alle Makro- und Mesoklimazonen werden Faktoren miteinander berechnet, welche Einfluss auf die Aufnahmewahrscheinlichkeit nehmen. Ebenso liegt den Satelliten Providern ein sog. Taskingplan vor, auf dem alle Taskings aufgelistet sind. Auf Grund der hohen Nachfrage nach Aufnahmen bestimmter Bereiche der Erde kann es in diesem Taskingplan zu Kollisionen kommen. Davon sind besonders oft Nadiraufnahmen betroffen, da die Betreiberfirma meist zu Zielen quer zur Flugrichtung schwenkt, um höher priorisierte Taskings zu erfüllen und somit die Agilität der Satelliten maximal auszunutzen. Dazu bieten die meisten Satellitenprovider eine Erhöhung der Priorität zu einem Aufpreis an, um folglich auch die Wahrscheinlichkeit für diese Aufnahmen zu erhöhen. Die Feasibility-study kann allerdings nur durch langfristig bekannte Faktoren erstellt werden. Kurzfristige Effekte, wie Bewölkung oder das kurzfristige Tasking durch Kunden mit einer höheren Taskingpriorität, können auch kurz vor der geplanten Aufnahme diese verschieben oder ganz verhindern.

Tasking von VHR Systemen

Die Einflussmöglichkeiten und Parameter auf das Tasking haben sich durch den technischen Fortschritt in den letzten Jahren deutlich erhöht. Die aktuelle Generation der VHR-Satelliten lässt durch ihre Agilität mehr Aufnahmen zu und ermöglicht somit sogar die Aufnahme bzw. das Tasking von mehreren Stereoaufnahmen bzw. Mehrfachstereoaufnahmen aus einem Orbit. Die Feasibility sinkt jedoch im Normalfall für jede zusätzliche Aufnahme aus demselben Orbit, da sich der gesamte Zeitraum erhöht, in der der Satellit in einem Überflug mit den Aufnahmen beschäftigt ist. Je nach Anzahl der Aufnahmen bzw. nach der Länge dieses Zeitraums wird es wahrscheinlicher, dass andere Kunden mit einer evtl. höheren Taskingpriorität den Aufnahmezeitpunkt für sich beanspruchen und somit die Aufnahme verhindern. Da der Katastrophenschutz, militärische oder geheimdienstliche Institutionen meist eine höhere Taskinpriorität als zivile Institutionen besitzen, kommt es oft dazu, dass Aufnahmen, welche sich in der Nähe von Krisenregionen befinden, nicht zustande kommen. Auf Grund der Tatsache, dass der

²⁴ Freie Übersetzung des Autors

Satellit nur in bestimmten Bereichen seiner orbitalen Flugbahn genug Energie durch seine Solarpaneele aufnehmen kann, müssen Schwenkbewegungen, Downlinks zu Bodenstationen und Aufnahmen mit der für den Satelliten verfügbaren Energie durchführbar sein. Auch wenn der Satellit theoretisch ein Ziel aufnehmen könnte, kann es sein, dass er durch vorhergehende Aufnahmen oder Schwenkmanöver zu viel Energie verbraucht hätte, um weitere Aufnahmen durchführen zu können.

Die Satellitenprovider optimieren ihre internen Taskingpläne im Allgemeinen nach einem für sie möglichst wirtschaftlichen Prinzip. Es gilt so viele Aufnahmen durchzuführen wie möglich und den Satelliten so weit auszulasten, wie es die Energieversorgung zulässt. Jede Aufnahme, auch diejenige, welche nicht durch Kunden bestellt worden ist, kann im Archiv mehrfach verkauft werden. Bei Fällen, in welchen eine Aufnahme auf Grund einer höher priorisierten Aufnahme nicht getätigt werden kann, spricht man von der sog. competitive Feasibility. Effekte, die nicht durch andere Kunden, sondern durch physikalische Effekte wie zum Beispiel Wettereinflüsse hervorgerufen wurden, fallen unter die sog. physical Feasibility.

Beispiel eines Taskingvorgangs

Momentan bieten die Satellitenbetreiberfirmen DigitalGlobe und Airbus Space and Defense (und andere Anbieter) verschiedene Taskingmöglichkeiten für ihre VHR Satellitensysteme an. Die Firmen offerieren dabei diverse Taskingmodelle, welche unterschiedliche Möglichkeiten zur Parametrisierung, Priorisierung und Zeitplanung geben. Die Einflussmöglichkeiten auf Parameter wie den Aufnahmewinkel, sowie die Möglichkeit, Stereoaufnahmen zu tasken, sind jedoch teilweise mit Preisaufschlägen verbunden.

Ein typischer Taskingvorgang bis zur Bildaufnahme läuft in der Praxis meist folgendermaßen ab: Der Kunde kontaktiert den Satellitenprovider mit einer Anfrage. Diese enthält unter anderem folgende Daten:

- Welche Fläche aufgenommen werden soll,
- ein Start- und Enddatum für das Tasking, als Zeitraum in dem aufgenommen werden kann,
- eventuelle Zusatzparameter,
- eine gewünschte Taskingpriorität,
- sowie das gewünschte, einzusetzende Satellitensystem bzw. mehrere Systeme.

Der Satellitenprovider analysiert die Anfrage mit Hilfe des internen Taskingplans, berechnet Faktoren auf Grundlage klimatisch bedingter Wettereffekte, Wetterarchiven, der Orbitinformation und der competitive Feasibility, erstellt daraus eine Feasibility-study und gibt unter Umständen die Wahrscheinlichkeit einer Aufnahme an den Kunden weiter. Kurz vor einer möglichen Aufnahme kontrolliert der Satellitenprovider die Wolkenbedeckung und die Auslastung des Satelliten. Fällt die Aufnahme in die vom Kunden vorgegebenen Parametergrenzen, wird die Aufnahme getätigt. Einige Taskingmodelle binden, falls ein oder mehrere Parameter von ihren Sollwerten abweichen, den Kunden kurz vor der Aufnahme bei der Entscheidung mit ein, ob eine Aufnahme trotz dieser Abweichungen getätigt werden soll.

4.1 Nutzen der Archive moderner stereofähiger Satellitensysteme

Die Archive der modernen VHR Sensoren sind seit 2008, als Worldview-2 und Geoeye-1 die Satelliten Worldview-1 und Ikonos mit ihren Diensten ergänzten, stetig gewachsen. Vor kurzer Zeit wurden die Satelliten durch weitere hochagile Systeme, Pleiades 1A und 1B, sowie SPOT 6 ergänzt. Die Bilddatenmenge, die sich seit dem Start von Ikonos im Jahr 1999 in den Archiven der Satellitenbetreiber befindet, wächst ständig und immer schneller. Noch in diesem Jahr ist der Start weiterer Systeme, der Satelliten Worldview-3, und SPOT 7 angekündigt. Eben diese Entwicklung, die maßgeblich zum Entstehen dieser Arbeit geführt hat, kann und darf nicht ignoriert werden. Da für die Erzeugung von Höhenmodellen mindestens zwei aus passenden Winkeln aufgenommene Bilder benötigt werden, ist es dringend nötig, die Archive in Bezug auf Kombinationen mit möglichen Neuaufnahmen oder anderen Archivdaten zu untersuchen.

Wirtschaftliche Vorteile einer Archivnutzung

Laut der Preisliste (Preisliste Egeos, Stand Januar 2014) beträgt der Preis pro Quadratkilometer der Worldview-Satelliten von panchromatischen Stereoaufnahmen, welche mindestens 90 Tage im Archiv verweilen, 26 \$ pro km². Bei einem erweiterten Tasking (DigitalGlobe²⁵: SelectPlus) liegt der Preis pro km² bei 84 \$. Einzelaufnahmen haben einen Archivpreis von 13 \$ pro km² und für ein erweitertes Tasking 42 \$ pro km². Setzt man die Annahme voraus, dass aus einer Kombination von Einzelszenen aus einem Archiv ein gleichwertiges Höhenmodell wie aus along-track Aufnahmen erstellt werden könnte, kann das eine Kostenreduktion von 84 \$ pro km² auf 26 \$ pro km² im Fall einer Stereoaufnahme bedeuten. Es könnten somit theoretisch 29 \$ pro km² eingespart werden. Eine solche Annahme kann jedoch nicht allgemein getroffen werden, da unter anderem in manchen Anwendungen von Höhenmodellen Aktualität essentiell ist, wie beispielsweise im Katastrophenschutz (JIAOJIAO ET AL., 2014). Aus diesem Grund sollen in diesem Abschnitt Möglichkeiten aufgezeigt werden, auf welche Weise Archivdaten mit Neuaufnahmen oder Archivaufnahmen untereinander kombiniert werden können. Damit ist es möglich verschiedene Ziele günstiger oder kostenneutral zu erreichen und den damit verbundenen Taskingaufwand zu minimieren bzw. zu vereinfachen.

Aufbau des Kapitels

Zu Beginn soll ein Überblick über die Archive des Anbieters DigitalGlobe gegeben werden, um deren Potential zu analysieren. Des Weiteren sollen neben den möglichen Kombinationsmöglichkeiten, welche im praktischen Teil der Arbeit analysiert werden, die Veränderung, die Optimierung und mögliche Vereinfachungen im Tasking aufgezeigt werden. Die Arbeit wird jedoch im folgenden Leitfaden nicht berücksichtigen, dass eine Kombination aus Aufnahmen mehrerer verschiedener Sensoren theoretisch auch möglich ist.

²⁵ Nach Satellite Tasking Data Sheet, http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Tasking-DS-TASK_1.PDF (Aufgerufen 23.2.2014)

4.1.1 Übersicht der archivierten Daten moderner VHR-Systeme

Zum 19. Februar 2014 deckte das Archiv der Firma DigitalGlobe mit den zugehörigen Satelliten eine Fläche von 4,631 Milliarden km² ab.²⁶ Diese Menge entspricht grob etwa neunmal der Erdoberfläche, wenn man davon ausgeht dass die Erde etwa 510 Millionen km² Oberfläche besitzt. Die Aufnahmen der VHR-Satelliten bedecken die Erdoberfläche jedoch nicht homogen, sondern sind größtenteils auf die Landflächen beschränkt. Auf den Landflächen ist die Häufigkeitsverteilung der Aufnahmen von den Interessengebieten der Anwender abhängig.

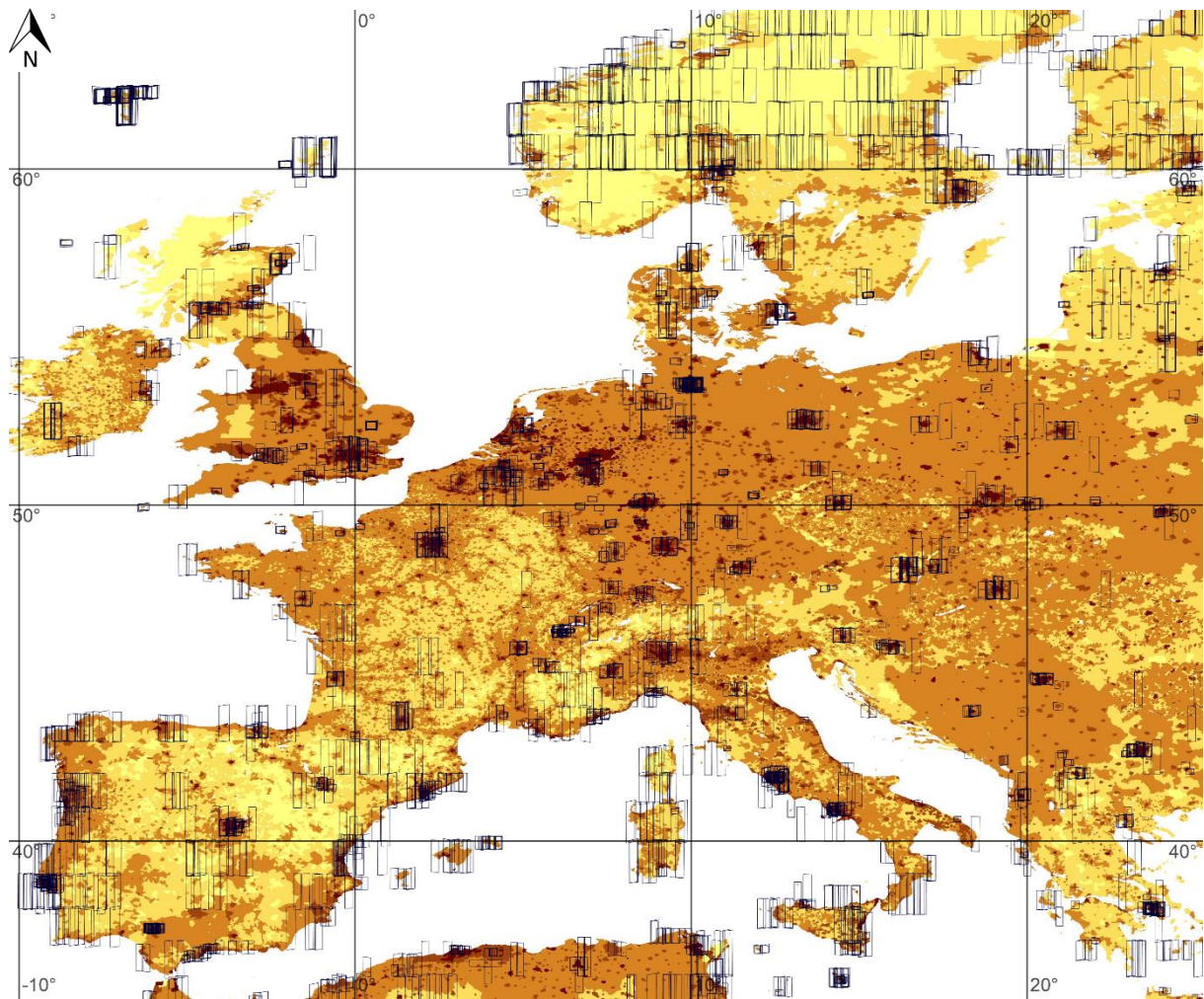


Abbildung 21: Footprints von Stereoaufnahmen des Satelliten Worldview-1 bis 18.2.2014

Im Hintergrund: Karte der Bevölkerungsdichte von Europa²⁷

Farbskala: Hellere Farben bedeuten eine geringe Bevölkerungsdichte, dunkle Farben eine hohe Bevölkerungsdichte

Auffällig bei der Ansicht der Footprints der Stereoszenen des Worldview-1 Satelliten ist die deutliche Häufung von Stereoaufnahmen in urbanen bzw. besiedelten Bereichen. Diese Häufung ist ebenso bei den anderen stereofähigen Systemen beobachtbar. Aus dieser Häufung lässt sich deuten, dass der Hauptanwendungszweck von along-track Stereoaufnahmen die Erstellung bzw. die Ableitung von Höhenmodellen oder von Modellen urbaner bzw. suburbaner Gebiete ist. Dies stellt keine Überraschung

²⁶ Nach Digital Globe Homepage, <http://www.digitalglobe.com/> (Aufgerufen 2.3.2014)

²⁷ Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP), v1, auswählbar als ESRI Basiskarte, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/grump-v1> (Aufgerufen 11.2.2014)

dar, denn die Anwendungsgebiete urbaner Höhenmodelle haben eine große Interessengemeinschaft. Städteplanung, Energiewirtschaft, infrastrukturelle Maßnahmen, Volumenschätzung, Funkstreckenplanung, Sichtbarkeitsanalysen und Simulationen sind nur einige von vielen Anwendungsbeispielen für hochgenaue Höhenmodelle in urbanen Bereichen. Eine weitere Auffälligkeit ist die starke Häufung von Stereoaufnahmen nördlich der 60 Grad auf der Nordhalbkugel und südlich der 60 Grad auf der Südhalbkugel, wie ausschnittsweise im oberen Bereich von Abb 21. zu sehen ist. Diese Auffälligkeit ist insbesondere bei den Satellitensystemen Worldview-1 und Worldview-2 zu beobachten. Da das SRTM²⁸ (Shuttle Radar Topography Mission) Höhenmodell, welches weltweit von 60 Grad Süd bis 60 Grad Nord verfügbar ist, genau an diesen Bereichen endet, liegt es nahe, dass ein Kunde oder die Betreiberfirma selbst ein Höhenmodell in diesen Breiten benötigt oder aufbauen will, um die fehlende SRTM-Abdeckung zu kompensieren. Dies ist allerdings nur eine Spekulation und kann allein durch die Satellitenbetreiber bestätigt werden.

*Tabelle 2: Anzahl der aufgenommenen Szenen bzw. Stereoszenen.
Daten vom 18.2.2014*

Satellitensystem	Anzahl aller aufgenommenen Szenen	Anzahl der along-track Stereoaufnahmen
Worldview-2	770721	55213
Worldview-1	981668	90832
Geoeye-1	173702	7502

Betrachtet man die Anzahl der Mono- bzw. Stereoaufnahmen mit dem Hintergrundwissen, dass die Archive stetig weiter wachsen und mehrere ähnliche Aufnahmesysteme hinzukommen, wird deutlich, dass eine Auswahl von Archivszenen durch eine größer werdende Auswahl immer leichter fällt. In folgendem Abschnitt soll erörtert werden, welche Kombinationen aus Archivdaten und Neuaufnahmen möglich sind und welche Faktoren bei der Planung bzw. beim Tasking einer solchen Situation zu beachten sind.

4.1.2 Kombinationsmöglichkeiten von archivierten Daten

Die Verwendung einer maximalen Anzahl von Archivaufnahmen liegt aus wirtschaftlichen Gründen nahe. In der praktischen Anwendung werden Höhenmodelle, abhängig vom abzubildenden Gebiet, durch Stereo- bzw. Triplet-Aufnahmen (drei Aufnahmen) erzeugt. Mit einer Kombination von Einzelbildern aus den Archiven lässt sich für den Fall von Worldview-2 Aufnahmen (Egeos Preisliste, stand Januar 2014²⁹) im Stereo-Fall eine maximale Kostenreduktion von 84 \$ pro km² auf 26 \$ pro km² und im Triplet-Fall eine Reduktion von 126 \$ auf 39 \$ pro km² treffen. Betrachtet man diesen Aspekt, könnte man mit derselben Aufwendung wie für ein Tasking bzw. eine Neuaufnahme statt einer Stereoaufnahme sechs Mono bzw. drei Stereoaufnahmen aus dem Archiv kombinieren. Anstelle einer Triplet-Neuaufnahme würde man mit dieser Kalkulation neun Mono-Archivaufnahmen kombinieren können. Gerade in urbanen Gebieten bieten sich durch eine solche Datenredundanz neue Möglichkeiten der Ausreißerdetektion. Aus einer sehr hohen Anzahl an Aufnahmen in passenden Winkeln resultieren

²⁸ SRTM DGM verfügbar auf <http://srtm.csi.cgiar.org/> (Aufgerufen 11.2.2014)

²⁹ Egeos Preisliste <http://www.e-geos.it/products/pdf/prices.pdf> (Aufgerufen 23.1.2014)

sehr wenige Verdeckungen in den abgeleiteten Höhenmodellen. Dies führt zu einer sehr guten Vollständigkeit trotz hoher Gebäude oder komplexer Topographie.

Neben der Möglichkeit, die Datenredundanz zu erhöhen, können Archivaufnahmen auch ergänzend zu Neuaufnahmen kombiniert werden. Die möglichen Kombinationen für Stereo-Aufnahmen und Triplet-Aufnahmen werden in Tabelle 3 gezeigt. In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, unter welchen Umständen diese Kombinationen getroffen werden, und welche Vor- bzw. Nachteile diese haben können.

Tabelle 3: Preise verschiedener Stereokombinationen

Kombination (Worldview-2)	Preis (pro km ²) ³⁰
Stereo	
2 x Mono oder 1 x Stereo (Archiv)	26 \$
Mono (Archiv) + Mono (Neuaufnahme)	55 \$
2 x Mono/ 1 x Stereo (Neuaufnahme)	84 \$
Triplet	
3 x Mono (Archiv)	39 \$
2 x Mono oder 1 x Stereo (Archiv) + Mono (Neuaufnahme)	68 \$
1 x Mono (Archiv) + 2 x Mono oder Stereo (Neuaufnahme)	97 \$
3 x Mono (Neuaufnahme)	126 \$

Dynamik des Aufnahmebereichs zwischen mehreren Aufnahmen

Mit dem in diesem Kapitel verwendeten Begriff „Dynamik“ ist die temporal bedingte Unterschiedlichkeit zweier oder mehrerer Satellitenszenen gemeint. Die Dynamik von Archivdaten untereinander bzw. von Archivdaten und Neuaufnahmen ist primär von folgenden drei Faktoren abhängig:

- Klimazone
- Anthropogene Eingriffe
- Mesoklima

Je größer die Dynamik eines Bereichs ist, desto wahrscheinlicher sind fehlende Korrespondenzen bzw. fehlende Korrelationen innerhalb der Bilder. Umso größer also die Dynamik eines Bereichs, desto kürzer müssen die Zeitabstände zwischen einfließenden Satellitenbildern sein, um Voidbereiche zu minimieren. ZHU ET AL. (2008) beschreiben im Fazit ihrer Arbeit „Accuracy Investigation of Orthoimages obtained from High Resolution Satellite Stereo pairs“ dass die Dynamik bzw. der zeitliche Abstand zwischen einfließenden Szenen zwar eine Auswirkung auf die Genauigkeit der resultierenden Höhenmodelle hat, dieser Einfluss jedoch eine vernachlässigbare Auswirkung auf das Gesamtergebnis bezüglich der Genauigkeit besitzt. ZHU ET AL. (2008) können aus diesem Grund keine schwerwiegenden Genauigkeitsabweichungen finden, die durch die Dynamik zwischen den Szenen verursacht werden, und weisen auf das große Potential von across-track erzeugten Höhenmodellen hin. Die Vollständigkeit eines Höhenmodells wird dahingehend weitaus stärker beeinflusst als die Genauigkeit. Um die

³⁰ (nach Egeos Preisliste (29), Taskingvoraussetzung: Select Plus)

Vollständigkeit eines Höhenmodells zu maximieren, muss versucht werden, die Dynamik der einfließenden Szenen sowie die Verdeckungen durch eine optimale Winkelkonfiguration zu minimieren. Dies kann sowohl über eine optimierte Planung des Taskings und der Szenenauswahl mit Hilfe von a-priori Informationen, als auch über eine genaue Metadatenanalyse der möglichen Einzelszenen, sowie über Hintergrundinformationen des abzubildenden Bereichs bewerkstelligt werden. Eine Möglichkeit, wie eine Planung bzw. ein Tasking auf diese Weise optimiert werden kann, wird im folgenden Abschnitt erläutert. Die oben beschriebenen Faktoren wirken sich durch folgende Ausprägung auf die Dynamik aus:

- Von der Klimazone hängt es ab, welchen jahreszeitlichen Schwankungen das betreffende Gebiet ausgesetzt ist. Dazu zählen sowohl großskalige Wettereffekte wie der Monsun, Schneebedeckung, Blattwechsel, Vegetationsdichte, Überflutung und weitere langfristige makroklimatische Effekte.
- Anthropogene Eingriffe äußern sich primär durch land-, oder forstwirtschaftliche Veränderungen, durch bauliche Maßnahmen in der Infrastruktur bzw. in der Gebäudekonstruktion oder wasserbauliche Maßnahmen. Diese Veränderungen können sowohl in kurzen Zeiträumen als auch in längeren Zeiträumen stattfinden. Aus diesem Grund sind sie schlecht vorhersagbar, jedoch langfristig wahrscheinlich.
- Mesoklimatische Effekte sind von der geographischen Lage, der Topographie, der Höhenlage und der Klimazone abhängig. Das Mesoklima beschreibt die lokalen Abweichungen zum Makroklima. Zu den mesoklimatischen Effekten zählen beispielsweise eine höhenbedingte Schneebedeckung, Smog in den Städten, sowie Morgennebel im tropischen Regenwald oder in den Tälern.

4.2 Mögliche Werkzeuge zur Analyse und Planung

Mit der Kenntnis über die drei beschriebenen Ursachen der Dynamik eines Aufnahmebereichs bieten sich mehrere Möglichkeiten, die Dynamik eines Aufnahmebereichs, vor der Neuaufnahme, dem Kauf von Archivmaterial bzw. vor dem Versuch ein Höhenmodell abzuleiten, abzuschätzen. Diese Möglichkeiten finden teilweise auch in den Feasibility-studies bei der Berechnung der Faktoren der physical Feasibility Anwendung³¹. Da die Aufnahmen bei Archivaufnahmen jedoch schon getätigt wurden, kann man durch Recherchen zu einer Gesamtaussage über die optimale Aufnahmekomposition für das Matching kommen. Im Folgenden sollen Werkzeuge bzw. ein Leitfaden vorgestellt werden, welche dabei helfen können, diese Gesamtaussage zu treffen.

4.2.1 Dynamik

Die Analyse der Dynamik, welche durch die geographische Lage bzw. durch die Klimazone des abzudeckenden Bereichs verursacht wird, kann primär durch Informationen über das Klima dieses Bereichs abgeleitet werden. Es können dazu in erster Linie Klimadiagramme der Region verwendet werden. Je nach Ausprägung der Jahreszeiten, die sich auf Temperaturschwankungen und auf die

³¹ Worldview-2 Produktdatenblatt

http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG_WorldView2_DS_PROD.pdf (Aufgerufen 23.1.2014)

Niederschlagsmenge auswirkt, kann die Stärke der Dynamik abgeschätzt werden. Temperaturschwankungen und Veränderungen der Niederschlagswahrscheinlichkeit bzw. der Jahreszeiten allgemein können den Verlust von Blattwerk, eine Veränderung der Bodenbedeckung durch Austrocknung oder sogar eine Bedeckung durch Schneefall bedeuten. Dadurch muss, besonders bei der Kombination von Archivdaten mit Neuaufnahmen, darauf Wert gelegt werden, dass bis zum Ende des Taskingfensters der Neuaufnahme genügend Archivmaterial vorhanden ist, welches zur Aufnahmegeometrie passt. Andernfalls muss das Taskingfenster entsprechend der Dynamik des Bereichs verkürzt werden. Ebenso kann die zeitliche Distanz von möglichen Kombinationen aus Archivaufnahmen vor der Recherche selbst stark eingegrenzt werden.

Werkzeuge zur Einschätzung der Dynamik

Ein Werkzeug, welches jedoch nicht weltweit flächendeckend verfügbar ist, kann ein Wetterarchiv darstellen. Im Gegensatz zu einem Klimadiagramm können beispielsweise historische Wetterdaten des betreffenden Gebiets zu einem bestimmten Datum geographisch genauer und als Zeitreihe analysiert werden. Aus dem Ergebnis dieser Analyse kann eine Vorhersage über die betreffende Temperatur, den Niederschlag bzw. die Schneefallwahrscheinlichkeit der Archiv- oder Neuaufnahmen getroffen werden.

Weitreichendere und vor allem kurzweiliger Effekte kann das Mesoklima eines Bereichs auf einen Aufnahmebereich haben. Das Mesoklima ist in zu wenigen Bereichen der Erde ausreichend dokumentiert, um eine Aussage über die Dynamik zwischen Aufnahmen als einzige Basis treffen zu können. Da das Mesoklima in Abhängigkeit von der Tageszeit und anderen, teilweise nicht vorhersagbaren oder dokumentierten Ursachen unterschiedliche Einflüsse haben kann, ist es essentiell, das betreffende Gebiet mit Bilddaten auf mesoklimatische Effekte hin zu untersuchen. Als verlässlichste Quelle dienen hierbei die Quicklooks. Sie stellen die verkleinerten Ansichten des jeweiligen Satellitenbildes im Archiv dar. Zwar zeigen die Quicklooks eine ganze Satellitenszene oft nur in einer Auflösung von maximal 1024 x 1024 Pixeln³², diese Auflösung reicht jedoch in den meisten Fällen aus, um eine mesoklimatisch bedingte Dynamik zwischen mehreren Aufnahmen festzustellen. Selbst auf einem Quicklook sind leichter Nebel, Smog, Überflutungen, der Schneebedeckungsgrad oder großflächige Veränderungen der Vegetation sichtbar. Besonders in Situationen, bei denen Archivdaten kombiniert werden sollen, stellen die Quicklooks neben den Metadaten die Hauptgrundlage für die Entscheidung einer passenden Kombination dar.

Für Neuaufnahmen kann lediglich eine Abschätzung über Quicklooks mit einem vergleichbaren Datum vom Vorjahr getroffen werden. Mit Hilfe dieser Abschätzung kann für dieses Gebiet das Taskingfenster so angepasst werden, dass es besser zu möglichen Archivaufnahmen passt. Dabei muss immer berücksichtigt werden, dass ein kleineres Aufnahme Fenster auch eine niedrigere Wahrscheinlichkeit für die Aufnahme bedeutet. Hat man die Möglichkeit andere optische VHR-Systeme zu verwenden, ist es naheliegend und nützlich, mehrere Taskings parallel zu ordern, welche bei erfolgreicher Aufnahme eines Systems in vielen Fällen kostenfrei storniert werden können.

Ebenso schlecht wie die mesoklimatisch hervorgerufene Dynamik, lässt sich die anthropogen hervorgerufene Dynamik vorhersagen. Dennoch kann für die Kombination von Archivdaten eine Vorhersage getroffen werden. Großskalige Veränderungen sind auf den jeweiligen Quicklooks erkennbar. Will man jedoch die Entwicklung einzelner anthropogener Objekte beobachten, reicht die

³² Archivdaten von Digital Globe, <https://browse.digitalglobe.com/imagefinder/main.jsp?> (Aufgerufen 25.2.2014)

Auflösung von Quicklooks nicht aus. Eine Möglichkeit, Veränderungen besonders in urbanen Bereichen festzustellen, ist die Verwendung von Google Earth³³. Google Earth bietet die Möglichkeit, sich für bestimmte Bereiche, Dank einer Mehrfachabdeckung durch VHR-Daten, historische Daten anzusehen. Diese Zeitreihen bieten in Großstädten oft mehrere Bilder pro Jahr. Da sich Google auch aus den Archiven der optischen VHR-Satellitenprovider bedient, kann es in manchen Fällen vorkommen, dass die in Frage kommenden Szenen im Archiv mit den Aufnahmen von GoogleEarth identisch sind. Analysiert man eine Zeitreihe für den entsprechenden Bereich, kann oft genau festgestellt werden, inwiefern sich anthropogene Objekte verändert haben. Wenn die GoogleEarth Zeitreihe einen größeren Zeitraum abdeckt, der die in Frage kommenden Aufnahmen einschließt, kann aus Veränderungen in der Zeitreihe geschlossen werden, dass im Zeitraum zwischen den Archivaufnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls eine Veränderung stattgefunden haben muss.

Im folgenden Abschnitt soll ein Vorschlag für die Gestaltung eines Workflows für ein Tasking bzw. für eine Planung vorgeschlagen werden, wenn für die Rekonstruktion sowohl Archivaufnahmen als auch Neuaufnahmen oder eine Kombination aus beiden in Frage kommen.

4.2.2 Veränderung des Taskingvorgangs durch Verwendung von Archivdaten

Folgender Entwurf eines Workflows soll ein Vorschlag für eine mögliche Durchführung einer Planung und eines Taskings darstellen, welcher die Verwendung von Archivszenen und die mögliche Kombination mit Neuaufnahmen berücksichtigt. Für Höhenmodelle, deren Priorität es ist, eine möglichst aktuelle Situation abzubilden, sind immer mindestens zwei Neuaufnahmen in einer guten Winkelkombination nötig. Der Vorschlag behandelt eine Planungssituation für ein Höhenmodell aus drei Bildern, dessen Priorität nicht primär in der Aktualität liegt. Dabei wird davon ausgegangen, dass radiometrisch robuste Ähnlichkeitsmaße für das Matching verwendet werden. Sollte dies nicht der Fall sein, ist es ratsam, dass für die Suche nach möglichen Kombinationen auch der Einfallswinkel der Sonne möglichst ähnlich ist. Ohne robuste Ähnlichkeitsmaße im Matching und stark unterschiedlichen Sonnenstand kann es zu großen Voidbereichen kommen. Als Grundprinzipien bei der Planung sollen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Maximale Anzahl von Archivaufnahmen, minimale Anzahl von Neuaufnahmen (aus wirtschaftlichen Gründen)
- Bevorzugt werden Nadiraufnahmen aus Archivaufnahmen (auf Grund der niedrigen Wahrscheinlichkeit dass bei einer Neuaufnahme eine Nadiraufnahme zustande kommt)

³³ Google Earth, erreichbar unter Earth.Google.com, Information zu historischen Daten:
<http://www.google.de/earth/learn/beginner.html#tab=historical-imagery> (Aufgerufen 23.2.2014)

Tabelle 4: Abfolge des Workflows einer angepassten Planung

Schritt	Tätigkeit	Ergebnis
1	Datenrecherche Durchsuchen der Archive aller verwendbaren Sensoren nach Aufnahmen des gewünschten Bereichs.	Liste aller in Frage kommenden Szenen
2	Analyse der Metadaten Untersuchung der Szenen bezüglich ihrer Stereowinkel: Auftragen möglicher Kombinationen in Skyplots, errechnen der Konvergenzwinkel.	Skyplots möglicher Kombinationen, Liste möglicher Kombinationen mit Metadaten
3	Analyse des abzubildenden Bereichs Analyse bezüglich der in 4.2.1 beschriebenen Dynamikfaktoren mit Hilfe von Metadaten, Klimadiagrammen, Drittdata und Quicklooks.	Maximaler temporaler Abstand zwischen Szenen und eventuelle Abhängigkeiten
4	Auswahl von plausiblen Kombinationen Auswahl der Kombinationen, welche die Kriterien von 3. erfüllen. Untersuchung, ob eine Kombination mit Neuaufnahmen möglich ist.	Aktualisierte Liste
5	Evaluation möglicher Kombinationen Folgende Liste zeigt die bevorzugte Kombination nach den im oberen Abschnitt beschriebenen Grundprinzipien. von 1 (beste) bis 11 (schlechteste), Archivaufnahme (A) und Neuaufnahme (N) 1. Along-track Triplet(A) 2. In-track Stereo mit Nadiraufnahme (A) + Monoaufnahme (A) 3. In-track Stereo ohne Nadiraufnahme (A) + Monoaufnahme (A) im Nadir 4. 3 x Monoaufnahme (A) 5. In-track Stereo mit Nadiraufnahme (A) + Monoaufnahme (N) 6. 2 x Monoaufnahme mit Nadiraufnahme (A) + Monoaufnahme (N) 7. In-track Stereo (A) + Monoaufnahme (N) im Nadir 8. 2 x Monoaufnahme (A) + Monoaufnahme (N) im Nadir 9. 1 x Monoaufnahme (A) im Nadir + 2 x Neuaufnahme 10. 1 x Monoaufnahme (A) + Neuaufnahme mit Nadiraufnahme 11. 3 x Neuaufnahme	Auswahl der Kombination
6	Bestellung und Tasking Bei Kombinationen aus Archiv und Neuaufnahmen: Bestellung der Archivaufnahmen nach erfolgreicher Aufnahme.	Satellitenaufnahmen

Diese Abfolge kann für Höhenmodelle aus mehr als drei Bildern beliebig erweitert werden, Schritt fünf muss dementsprechend ergänzt werden. Für die Neuaufnahme wurde im Falle von zwei Aufnahmen angenommen, dass beide Aufnahmen aus demselben Orbit aufgenommen wurden. Da sich die Möglichkeiten der Parametrisierung und der Flexibilität des Taskingvorgangs der Satellitenprovider untereinander stark unterscheiden, muss vor jeglicher Planung evaluiert werden, ob das vorgeschlagene Modell durchführbar ist.

Da man auch Archivdaten eines VHR-Satelliten durchsuchen kann, gibt es auch die Möglichkeit, Höhenmodelle aus zwei verschiedenen Sensoren zu fusionieren. Der Fall eines Multisensormatchings wurde bisher noch nicht näher in der Literatur behandelt, stellt sich aber als Erfolgsversprechend dar.

Einen einfacheren Fall für eine Fusion nach dem Matching beschreibt folgendes Beispiel: Es befinden sich in den Archiven jeweils zwei Stereoszenen eines AOI, welche von verschiedenen Sensoren aufgenommen wurden. Von beiden Stereokompositionen wird anschließend ein Matching durchgeführt, die resultierenden Höhenmodelle werden fusioniert und ergänzen sich somit zu einem vollständigeren Höhenmodell.

5 METHODEN ZUR ANALYSE UND PROZESSIERUNG

Innerhalb der letzten 10 Jahre haben sich durch den technischen Fortschritt in der Satellitentechnik, Sensorik und Computertechnik die Möglichkeiten für die Aufnahme und Prozessierung, sowie die Genauigkeit, die Anwendungsgebiete und Anwendungszwecke von digitalen Höhenmodellen stark vergrößert. Durch die Erzeugung digitaler Höhenmodelle aus optischen Daten wurde die Akquise der Daten günstiger und einfacher als bei Höhenmodellen, welche durch luftgestützte Laserscanner erzeugt werden. Es existieren bis jetzt wenige dokumentierte Techniken für die statistische Analyse von Höhenmodellen aus optischen VHR Daten. Auch weil die Qualitätsanforderungen eng an spezifische Anwendungszwecke gebunden sind, war bis vor kurzer Zeit kein eindeutig beschriebenes Vorgehen für die Analyse von digitalen Oberflächenmodellen vorhanden.

Analysemethoden für digitale Höhenmodelle

Daher beschreiben REINARTZ ET AL. (2010) im Paper “Benchmarking and Quality Analysis of DEM Generation from high and very high resolution optical satellite data“ über die ISPRS Benchmark Kampagne einige Techniken, mit welchen Höhenmodelle aus optischen VHR Daten auf qualitative und quantitative Art mit Referenzdaten verglichen werden können, beziehungsweise wie die Voraussetzungen für eine Analyse dieser Daten geschaffen werden können. Darüber hinaus schlagen REINARTZ ET AL. (2010) in ihrer Arbeit vor, verschiedene Ausschnitte unterschiedlicher Ausprägung getrennt voneinander zu analysieren, da es durch unterschiedliche Oberflächenarten zu verschiedenen Fehlern im Höhenmodell kommen kann. Dies kann einerseits wertvolle Ergebnisse für Anwender liefern, die besonderen Wert auf die vorherrschende Oberflächenausprägung eines Ausschnitts legen, andererseits soll eine Aufteilung in Ausschnitte die Handhabung durch Reduktion der Datenmenge erleichtern. Diese Ausschnitte sollten, wie REINARTZ ET AL. (2010) weiter darstellen, abhängig von ihren vorherrschenden Features (Gebäude, Vegetation) beziehungsweise Geländeausprägung (Hangneigung, Ausrichtung und Rauheit) und ihrer verfügbaren Referenzdaten analysiert werden. Dabei können im Falle eines digitalen Geländemodells als Referenz, welches allein das Gelände ohne Vegetation oder anthropogene Objekte zeigt, entweder nur unbedeckte Bereiche verglichen werden, oder das DSM muss gefiltert werden, damit diese Objekte nicht mehr vorhanden sind.

Statistische und visuelle Methoden

D’ANGELO & REINARTZ (2011) verweisen in ihrem Paper „Semi-global Matching Results on the ISPRS Stereo Matching Benchmark“, in welchem ein vollautomatischer Ansatz für die Ableitung von digitalen Höhenmodellen auf Grundlage des Semi-global Matching Algorithmus nach HIRSCHMÜLLER (2005) mit den Datensätzen des ISPRS Benchmarks analysiert wird, auf statistische Analysemethoden von HÖHLE & HÖHLE (2009). Sie stützen sich in dieser Datenanalyse neben etablierten Fehlermaßen auf die statistisch robusten Fehlermaße nach HÖHLE & HÖHLE (2009), da etablierte Fehlermaße gegenüber Ausreißern in den Daten wenig robust sind und oft verfälschte Ergebnisse liefern. Dieses Vorgehen harmonisiert mit dem Vorschlag von REINARTZ ET AL. (2010), grobe Fehler durch starke Abweichungen zu den Referenzdaten zu detektieren und auszuschließen. Für eine weitere Analyse schlagen REINARTZ ET AL. (2010) vor, in urbanen Bereichen anthropogene Objekte separat zu analysieren. Dadurch werden die Ergebnisse nicht durch Fehler anderer Oberflächenarten beeinflusst und können als einzelnes Objekt genau analysiert werden. Für eine Analyse von digitalen Geländemodellen schlagen PODOBNIKAR

(2009) und KAREL ET AL. (2006) eine Reihe von statistischen und visuellen Analysemethoden vor. PODOBNIKAR (2009) fasst in seinem Vorschlag zur Analyse von Geländemodellen zusammen, dass eine statistische Analyse, welche mit einer visuellen Analyse verknüpft wird, eine gute Möglichkeit darstellt, oft subjektiv beeinflusste Ergebnisse der visuellen Analyse mit objektiven Ergebnissen der statistischen Analyse zu verknüpfen. Dadurch könnten seiner Meinung nach komplexe Probleme analysiert werden. Einige Methoden eignen sich jedoch nicht nur für digitale Höhenmodelle, sondern auch für die Analyse einzelner Ausschnitte oder einzelner Features in digitalen Oberflächenmodellen. BERRY (1987; 2007) führt zum Zwecke der Datenanalyse eine Kategorisierung ein, die für viele Operationen auch heute noch Bestand hat. In den nächsten Abschnitten werden einige Analysemethoden, die von D'ANGELO (2010), HÖHLE & HÖHLE (2009), PODOBNIKAR (2009), KAREL ET AL. (2006) und BERRY (1987; 2007) vorgeschlagen wurden und in der anschließenden Analyse verwendet werden, erläutert. Zum Abschluss dieses Kapitels soll ein Überblick über die Prozessierungsschritte gegeben werden, mit welchen die Testdaten erstellt wurden.

5.1 Visuelle Analysemethoden

PODOBNIKAR (2009) und KAREL ET AL. (2006) beschreiben in ihren Studien zur Analyse von digitalen Geländemodellen mehrere Methoden, welche sich explizit auf digitale Geländemodelle beziehen. Dabei wird besonders viel Wert auf die Erkennung von Fehlern und unplausiblen Abbildungen gelegt. Bei der Analyse eines Geländemodells ohne Referenzdaten spielen Faktoren, welche die Plausibilität eines Geländes bewerten, eine große Rolle. Regeln, wie sie auch in der Kartographie festgelegt sind, finden in den beiden Arbeiten viel Anwendung. Beispielsweise ist die gewährleistete Kontinuität von Höhenlinien eine Möglichkeit, das betreffende Gelände zu bewerten. Für die Analyse von digitalen Oberflächenmodellen ist es jedoch auch zum Teil möglich, die von PODOBNIKAR (2009) vorgeschlagenen Werkzeuge für Bereiche, die frei von Vegetation und anthropogenen Objekten sind, zu verwenden oder zu adaptieren. Betrachtet man, wie von REINARTZ ET AL. (2010) vorgeschlagen, die Bereiche ausschnittsweise oder untersucht objektweise, können einige dieser Werkzeuge auch für anthropogene Objekte oder für die Vegetation adaptiert werden. HÖHLE & HÖHLE (2009) beschreiben in ihren Vorschlägen zur Analyse von Höhenmodellen zusätzlich noch Histogrammansichten und Q-Q Plots (Quantil-Quantil Plots), welche die Unterschiede zu normalverteilten Daten zeigen sollen. Für die visuelle Analyse ist es dabei auch möglich, Drittdaten mit einzubeziehen. Diese können die Plausibilität der Höhenmodelle bestätigen oder widerlegen. Dabei ist es besonders wichtig, sofern die Daten eine eindeutige Aussage über einen Sachverhalt treffen können, dass die Daten aktuell sind bzw. zeitlich zu den zu prüfenden Modellen passen. Diese erwähnten Drittdaten sind zum Beispiel die Verwendung von Google Streetview in fraglichen Bereichen, oder die Verwendung von Gebäudegrundrissen aus amtlichen Daten, sofern diese verfügbar sind. PODOBNIKAR (2009) erwähnt in seinem Leitfaden, dass für die Analyse Fremddaten, welche explizit keinen Zusammenhang mit den Ausgangsdaten für das Höhenmodell haben, für die Analyse förderlich sind. Voraussetzung dafür ist, dass eine Einschätzung über diese Daten getroffen werden kann und diese Daten den genauen Positionen im Höhenmodell zugeordnet werden können.

5.1.1 Analyse von Profillinien

Eine einfache und objektive Möglichkeit der visuellen Untersuchung von einem oder mehreren digitalen Höhenmodellen bieten die Profillinien (PODOBNIKAR, 2009). Mit Profillinien können entlang eines Pfades folgende Eigenschaften überprüft werden:

- **Parallelität der Profillinien**

Weisen mehrere Höhenlinien eine Parallelität auf, besonders in Bereichen von Änderungen in vertikaler Richtung, so weisen die betreffenden Höhenmodelle eine Ähnlichkeit auf. Je mehr die Linien einer Parallelität entsprechen, desto ähnlicher sind diese Höhenmodelle.

- **Rauschen**

Rauschen äußert sich in Profillinien durch kleinräumige vertikale Veränderungen bzw. zackige Strukturen über kurze horizontale Distanzen. Starke vertikale Abweichungen, welche nur als lokales Phänomen auftreten, sind dabei eher Ausreißer, während ein über die gesamte Profillinie auftretendes Phänomen als Rauschen bezeichnet werden kann.

- **Regelmäßige Abweichungen**

Regelmäßige Abweichungen sind sehr einfach zu erkennen. Erfüllen Profillinien das Parallelitätskriterium und besitzen eine gleichmäßige Abweichung in positiver oder negativer Richtung, spricht man von einer regelmäßigen Abweichung oder einem sogenannten Shift.

- **Verschiebungen in horizontaler Richtung**

Schwieriger zu erkennen sind Verschiebungen von Höhenmodellen in horizontaler Richtung. Regelmäßige Verschiebungen erkennt man daran, dass an vertikalen Kanten mehrerer Profile verschiedener Richtung eine Verschiebung in horizontaler Richtung auftritt. Diese Verschiebungen müssen jedoch nicht regelmäßig sein, sondern können beispielsweise bei Vergleichen von gefilterten und nicht gefilterten Daten auftreten. Ein gutes Beispiel ist der Vergleich zweier Höhenmodelle im Bereich einer Gebäudekante, wobei in einem Höhenmodell eine Filterung durch einen Medianfilter vorgenommen wurde. Durch den Medianfilter ist es möglich, dass sich Bereiche, welche sich zuvor in Bodennähe befanden, nun auf der Höhe des Gebäudes befinden.

In dieser Arbeit werden, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen, bei der Analyse von Profillinien weder ein Filter, noch eine Ausreißerentfernung oder eine Interpolation durchgeführt. Dadurch können auch Aspekte wie Vollständigkeit, Rauschen und Artefakte genauer untersucht werden.

5.1.2 Visueller Vergleich

Einen visuellen Vergleich kann man auf vielfältige Art und Weise treffen. Man erhält dabei die Chance, die Höhendaten direkt visuell so anzupassen, dass verschiedene Ausprägungen deutlich werden. Einige dieser Möglichkeiten werden von BERRY (1987, 2007) sowie PODOBNIKAR (2009) genannt und finden

in vielen Bereichen der Analyse von Rasterdaten Anwendung. Berry gibt dabei vier Operationsgruppen für die Analyse an:

- **Reklassifizierung**

BERRY (1987) nennt für die Reklassifizierung Operationen, welche an Hand des Inhalts der Daten eine oder mehrere Neueinteilungen der Daten in eine oder mehrere neue Gruppen vornehmen. Diese Gruppen können anschließend zur Ansicht mittels einer Farbkarte (Color map) eingefärbt werden. Somit können, in Abhängigkeit von der Methode zur Klassifikation der Daten, unterschiedliche Themen genauer betrachtet werden. Als Beispiel führt BERRY (1987) dabei unter anderem die Einteilung von Höhendaten in Höhenschichten, ein „level slicing“ (BERRY, 1987) an. Andere Klassifikationen sind nach BERRY (1987) beispielsweise mathematische Operationen (Grundrechenarten, Maximierung und Minimierung, statistische Operationen), Generalisierung, Formanalysen und räumliche Integrität (Fehlen von Daten).

- **Übereinanderlegen von Daten (Overlay)**

Das Übereinanderlegen von Daten kann zur Analyse von Zusammenhängen zwischen den Daten dienen. Als Beispiele werden von BERRY (1987; 2007) das Übereinanderlegen einer Hangneigungskarte und einer Landbedeckungskarte erwähnt. Im Kontext der Differenzanalyse zweier Höhenmodelle kann beispielsweise ein Differenzbild der Höhenmodelle übereinander gelegt werden, um die Fehler bestimmten Bereichen zuordnen zu können. Es können dabei verschiedenste Datensätze verwendet werden, sofern diese in ihrer Lage gut harmonisieren.

- **Maße der Entfernung und der Verbindungen untereinander**

In diese Kategorie teilt BERRY (1987) Wahrscheinlichkeitskarten oder Buffer um bestimmte Objekte ein.

- **Kategorisierung kartographischer Nachbarschaften**

PODOBNIKAR (2009) erweitert und präzisiert diese Operationen, um das speziell für digitale Geländemodelle passende analytische Shading³⁴. BERRY (1987) teilt in diese Kategorie lokale Filteroperationen mit einem Kernel ein. Dazu zählen beispielsweise Aspect (Hangexposition) oder Slope (Hangneigung). Ebenso zählt er in diese Kategorie die Analyse bzw. Erstellung von Profillinien.

PODOBNIKAR (2009) beschreibt außerdem die perspektivische Ansicht, welche sich nicht direkt in die Liste von BERRY (1987) einteilen lässt. Sie kann ebenso durch Reklassifizierung, Overlays oder Kategorisierung visuell angepasst werden. PODOBNIKAR (2009) macht in seiner Arbeit unter anderem auch den Vorschlag, weiterverarbeitete Daten, wie zum Beispiel Wasserscheidenberechnungen oder hydrologische Modelle aus den Höhendaten, mit Referenzmodellen oder Wasserscheiden aus Karten auf ihre Ähnlichkeit zu überprüfen. Überträgt man diese Analysemethode in die Analyse von Höhenmodellen mit urbanem Kontext, liegt es nahe, beispielsweise abgeleitete Gebäudegrundrisse mit

³⁴ Shading bedeutet „Schattierung“ und färbt eine Oberfläche abhängig ihrer Exposition auf Grundlage ihres Normalenvektors ein.

Drittdaten zu analysieren. Ebenso könnte ein abgeleitetes digitales Geländemodell aus einem digitalen Oberflächenmodell mit einem Referenzgeländemodell verglichen werden.

Visuelle Kontrolle (Interpretation)

Gerade bei der Untersuchung von Höhenmodellen aus optischen Daten verschiedener Zeitpunkte bietet es sich an, die Orthophotos der einzelnen eingeflossenen Szenen zu untersuchen. Bei Höhenmodellen, welche aus zeitlich auseinanderliegenden Eingangsdaten entstanden sind, kann damit der Ursprung mancher Artefakte oder Voidbereiche erklärt werden. In Bereichen von offensichtlicher und großer Veränderung ist es wie in Kapitel 4.2.1 bereits erwähnt nicht möglich, dass entsprechende Bereiche richtig oder vollständig rekonstruiert werden. Für die Analyse bietet es sich an, die entsprechenden Bilder übereinanderzulegen und anschließend durch manuelle Eingaben zwischen den Bildern zu wechseln. In vielen geographischen Informationssystemen ist ein sog. „Flicker“ Werkzeug integriert, um den Wechsel zwischen den Bildern zu automatisieren. Ebenso ist es möglich, die Transparenz der Bilder zu ändern, um Unterschiede festzustellen.

Zusammenfassung

Visuelle Analysemethoden sind immer mit einer Interpretation von Daten verbunden. Dadurch ist das Ergebnis visueller Analysen immer von der jeweiligen Person abhängig, welche die Analyse durchführt. Aus diesem Grund sollte eine Analyse immer von Personen durchgeführt werden, die ein gutes Verständnis über die zu analysierenden Daten besitzen. Eine visuelle Analyse ist immer eine Interpretation und somit ein subjektives Ergebnis. Aus diesem Grund sollten Daten, wenn möglich, durch eine objektive Analyseform, zum Beispiel durch statistische Analysemethoden, durchgeführt werden.

5.2 Statistische Analysemethoden

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten genannt, unter welchen Umständen und auf welche Weise man statistische Vergleiche von Höhenmodellen bewerkstelligen kann. Dabei werden die im analytischen Teil verwendeten Fehlermaße sowie Interpretationsansätze und Einschränkungen dieser genannt und erläutert.

5.2.1 Vergleichbarkeit von optischen Höhenmodellen mit unterschiedlichen Referenzdaten

Es kommt oft vor, dass für die Bestimmung der Qualität eines Höhenmodells keine geeigneten Referenzhöhenmodelle vorhanden sind. Zudem sind die Anforderungen an ein Referenzhöhenmodell, welches ohne Beschränkungen bzw. Maskierungen als Referenz für ein gesamtes Höhenmodell verwendet werden kann, sehr hoch. Das Referenzhöhenmodell muss hinsichtlich seiner zu Grunde liegenden Daten zeitlich dem zu überprüfenden Höhenmodell ähnlich sein und damit alle Features beinhalten, welche im zu überprüfenden Höhenmodell auch vorhanden sind. Es muss selbst eine höhere Genauigkeit, sowie eine genaue horizontale und vertikale Lage besitzen. Will man einzelne Features, wie zum Beispiel Gebäude mit einem Referenzhöhenmodell vergleichen, muss gewährleistet sein, dass dieses in einer ausreichenden Auflösung oder Punktdichte vorliegt. Auch die Art der Daten, aus welchen

ein Höhenmodell abgeleitet wird, spielt eine große Rolle. Vergleicht man Höhenmodelle aus optischen Daten mit Punkten eines Lidar-Höhenmodells, muss man sich im klaren darüber sein, dass die Punkte aus dem Lidar-Höhenmodell beispielsweise auf einem kleinen Kamin eines Dachbereichs einen höheren Wert angeben können, als der durch Rasterzellen rekonstruierte Höhenwert der optischen Daten des selben Bereichs. Ebenso können Daten aus einem Lidar-Oberflächenmodell, welche in ein regelmäßiges Raster umgewandelt wurden, nicht immer eine genaue Referenz an Gebäudekanten darstellen.

Anforderungen und nötige Anpassungen von Referenzdaten

HÖHLE & HÖHLE (2009) schlagen dabei eine bilineare Interpolation bei der Umwandlung in ein Rasterformat vor. Ebenso sollten das Oberflächenmodell beziehungsweise die Referenz auf diese Weise auf dieselbe Auflösung interpoliert werden. Des Weiteren schlagen HÖHLE & HÖHLE (2009) für die Anforderung an eine Referenz vor, dass deren Genauigkeit mindestens dreimal so hoch ist, wie die des zu überprüfenden digitalen Höhenmodells. Nur dadurch können Höhenwerte sinnvoll miteinander verglichen werden, da sonst keine sinnvollen Höhenresiduen und keine vergleichbaren Ergebnisse produziert werden können. Ist man sich jedoch über die Einschränkungen des verwendeten Referenzhöhenmodells bewusst, so kann eingeschätzt werden, welche Art von Vergleich zwischen den Modellen getroffen werden kann. Im Beispiel des Testgebietes Madrid stehen nur sehr niedrig auflösende digitale Geländemodelle zur Verfügung. Da diese jedoch ihren Datenursprung in hochauflösenden und lagegenauen Daten haben, kann man diese Daten als Referenz für größere Freiflächen verwenden, um vertikale Fehler zu detektieren.

5.2.2 Fehlermaße

Um die Abweichungen eines digitalen Höhenmodells zu einer Referenz bzw. zu einem Referenzhöhenmodell genauer zu untersuchen, existieren zahlreiche Fehlermaße. Da sowohl das errechnete Höhenmodell, als auch das Referenzhöhenmodell Ausreißer beinhalten können, ist es hilfreich, robuste Fehlermaße zu benutzen (D'ANGELO & REINARTZ, 2010; HÖHLE & HÖHLE, 2009). Diese Fehlermaße, welche ihren Ursprung und ihre Anwendung in der explorativen Datenanalyse haben, sollen dazu dienen, die Daten und ihre Ausprägung möglichst gut zu beschreiben. HÖHLE & HÖHLE (2009) nennen in ihrer Analyse Möglichkeiten, Ausreißer bei der Berechnung von nicht robusten Fehlermaßen auszuschließen. Sie schlagen dabei den bereits bei Analysen von HÖHLE & POTUCKOVA (2009) eingesetzten Grenzwert $3 * RMSE$ und den oft eingesetzten Grenzwert $3 * \text{Standardabweichung}$ vor. Alle Werte, die dieses Kriterium nicht erfüllen, werden nicht für eine statistische Analyse verwendet. Dennoch bekräftigen HÖHLE & HÖHLE (2009), dass selbst durch diese Grenzwerte nicht alle Ausreißer entfernt werden können. Besonders jene Höhenmodelle, welche vor der Analyse nicht von groben Fehlern und Ausreißern bereinigt wurden, beinhalten oft mehrere Ausreißer, welche eine Statistik, die auf nicht robusten Maßen basiert, stark beeinflussen können. HÖHLE & HÖHLE (2009) gelangen zu dem Schluss, dass es keine Ausreißerdetektion gibt, die alle Ausreißer eliminieren kann. Es ist dabei nicht relevant, ob die Ausreißer sich in den Probedaten oder in den Referenzdaten befinden. Der Schluss daraus ist dass beides einen starken Einfluss auf das resultierende Ergebnis hat. D'ANGELO & REINARTZ (2010) verweisen für robuste Fehlermaße gegenüber Ausreißern auf HÖHLE & HÖHLE (2009), welche die robusten Maße N_{mad} (Normalisierter Median der absoluten Abweichung vom Median), den Median selbst und die Quantile 68,3 % und 95 % vorschlagen. Neben diesen Fehlermaßen

werden, wie in D'ANGELO (2010) die Standardabweichung und die mittlere Abweichung aller Höhenfehler $\overline{\Delta h}$ berechnet. Zusätzlich wird der RMSE (Root-mean-square Error) berechnet. Im Folgenden soll kurz auf die Fehlermaße Nmad und die Quantile, sowie auf die Berechnung der mittleren Abweichung eingegangen werden.

Berechnung der Höhenunterschiede

Die Berechnung der euklidischen Distanzen der Probe S zur Referenz R wird in der Form $\Delta h = S - R$ vorgenommen. Somit liegen positive Werte für Δh Abweichungen über der Referenz, negative Werte unter der Referenz. Nach HÖHLE & HÖHLE (2009) sollte das Vorgehen der Analyse wie folgt ablaufen: Nach der Berechnung der statistischen Maße sollten die Abweichungen des Nmad zum Quantil $\hat{Q}_{(0,683)}$ untersucht werden. Sollten sich starke Abweichungen ergeben, kann dies auf eine nicht normalverteilte Fehlerausprägung hinweisen, welche anschließend genauer untersucht werden sollte. Die Fehlermaße werden für jeden Ausschnitt und für jede mögliche und sinnvolle Kombination aus diesen Daten errechnet

5.2.3 Residuenverteilung

Eine verbreitete Ansicht für die Verteilung von Residuen ist die Histogrammansicht (HÖHLE & HÖHLE, 2009). Es können dabei auf einfache Weise die wichtigsten Ausprägungen einer Residuenverteilung dargestellt werden. Die Residuen können, um große Spitzen bzw. Frequenzen im Histogramm zu vermeiden, in sog. Bins („Büchsen“) eingeteilt werden, welche die Residuen entlang der horizontalen Achse zusammenfassen.

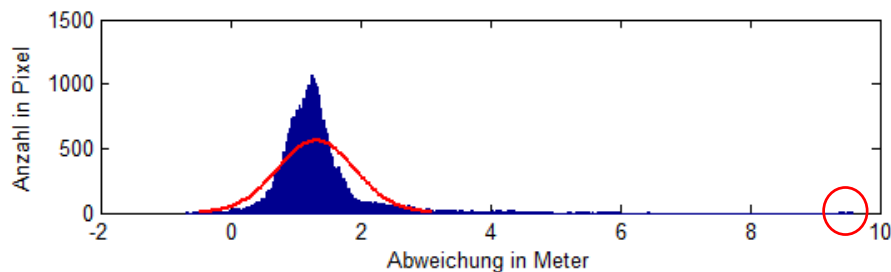


Abbildung 22: Histogramm der Verteilung von Residuen.

Rot: Ausreißer

Residuen eingeteilt in 500 Bins

Es ist zudem möglich, aus den Residuen die Standardabweichung σ und den Mittelwert $\hat{\mu}$ zu berechnen und um die Residuen zu vergleichen (Abbildung 22), eine entsprechende Normalverteilungskurve in die Ansicht der Residuen zu integrieren (FORSYTH & PONCE, 2012). In der Abbildung ist eine Gruppe von Ausreißern mit einem roten Kreis gekennzeichnet. Die Funktion für eine Normalverteilung mit den Parametern $\hat{\mu}$ und σ lautet:

$$y = f(x|\hat{\mu}, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\hat{\mu})^2}{2\sigma^2}}$$

Mit dem Histogramm der Residuen können die Abweichungen zu einer dazu zugehörigen Normalverteilungskurve durch die Skewness (Schiefe) und Kurtosis (Wölbung, Steilheit, Exzess)

beschrieben werden. Die folgenden skizzenhaften Beispiele sollen die Deformationen Skewness und Kurtosis kurz erläutern:



Abbildung 23: Kurtosis und Skewness
Links: Kurtosis
Rechts: Skewness

In Abbildung 23 kann man die Unterschiede in der Wölbung gut erkennen. Eine positive Wölbung (in blau dargestellt) deutet sich dadurch an, dass die Verteilungskurve eine schmal zulaufende Spitze und weiter auslaufende Enden hat. Eine negative Wölbung dagegen zeigt sich durch eine abgerundete oder flache Spitze und kurze Enden. Die Abbildung zeigt auch beide Ausprägungen, auf welche Weise sich Skewness äußern kann (rechts). Blau bedeutet dabei eine positive Skewness, rot eine negative Skewness. Auffallend bei einer solchen Ausprägung sind die weit auslaufenden Enden einer Verteilung.

Q-Q Plots

In der Statistik ebenso verbreitet sind sogenannte Quantil-Quantil Plots. Sie zeigen besonders gut die Abweichungen zu einer Normalverteilung der Daten. D'ANGELO (2010) und HÖHLE & HÖHLE (2009) schlagen diese Darstellungsart vor, da sie eine deutlichere Darstellung für die Residuen zu einer Normalverteilung bietet. In einem QQ-Plot (Quantil-Quantil Plot) wird zu Beginn die Normalverteilung durch vertikale Aufteilung in viele gleiche Flächen (so viele Flächen, wie Residuen vorkommen) aufgeteilt. Es werden so viele theoretische Quantile gebildet, wie Residuen vorhanden sind. Anschließend werden die Residuen ihrer Größe nach geordnet. Für den Plot selbst wird das zu Grunde liegende Residuum jedes Quantils der normalverteilten Kurve gegen das korrespondierende Residuum nacheinander geplottet. Würde die Verteilung der Probedaten einer perfekten Normalverteilungskurve entsprechen, würde sich im Plot eine gerade Linie von aneinandergereihten Punkten ergeben. Da dies in der Realität jedoch selten der Fall ist, wird im Plot zusätzlich eine Linie eingezeichnet, welche die Abschätzung der Abweichung von einer Normalverteilung verdeutlichen soll. Abbildung 24 zeigt ein Beispiel für einen QQ-Plot, welcher dieselben Residuen wie Abbildung 22 aufweist.

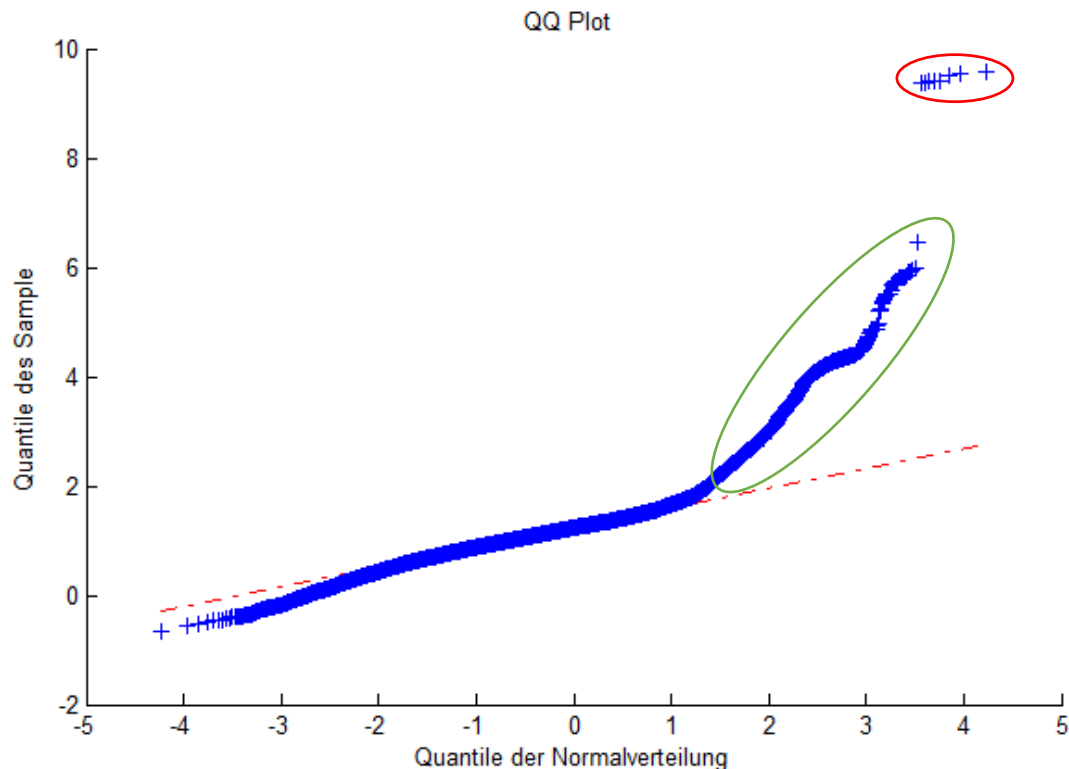


Abbildung 24: Beispiel eines QQ Plots

Durch die grüne Ellipse markiert: Hinweise auf eine Abweichung von der entsprechenden Normalverteilungskurve

Durch die rote Ellipse markiert: Ausreißer

Im QQ-Plot in Abbildung 24 zeigt sich, dass sich der zentrale und linke Bereich der Residuen gut an die Gerade im QQ-Plot anschmiegt. Es gibt jedoch an der rechten Hälfte des Plots Abweichungen von den Quantilen der Normalverteilung. Die Werte, welche im oberen rechten Bereich der Anordnung zu sehen sind (rot markiert), liegen weit verschoben zu den theoretischen Quantilen der Normalverteilung. Es handelt sich dabei mit hoher Wahrscheinlichkeit um die Ausreißer, welche in Abbildung 22 rot markiert wurden. Die abweichenden Werte, welche in grün markiert wurden, werden mit sehr großer Wahrscheinlichkeit durch die starke positive Kurtosis der Verteilung verursacht. Über die Position der Daten im Raum kann bei der QQ-Plot Abbildung keine Aussage getroffen werden, sondern nur über die Ausprägung der Verteilung

Quantile

Die absoluten euklidischen Distanzen der Höhenwerte $|\Delta h|$ werden in einer aufsteigenden Reihe $[x_1, \dots, x_n]$ dargestellt. Dabei steht x_1 für das Minimum der Fehlerverteilung und x_n für das Maximum beziehungsweise für die Größe der Probe. Das Quantil an der Stelle p ist definiert durch $\hat{Q}_{(p)} = x_{(j)}$, wobei $j = \lceil p * n \rceil$ gilt. Bei einer nicht eindeutigen Zuordnung wird aufgerundet. (HÖHLE & HÖHLE, 2009)

Der Median ist definiert als das 50%-Quantil, also an der Stelle $p = 0,5$. Für die Berechnung der Quantile wird in Anlehnung an HÖHLE & HÖHLE (2009) die absolute euklidische Distanz verwendet, da für die Analyse das Vorzeichen keine Rolle spielt, sondern nur die Größenordnung des Fehlers. Vereinfacht zeigt beispielsweise ein Quantil $\hat{Q}_{(0,98)}$, dass 98 % der Fehler unterhalb des resultierenden

Wertes liegen und 2 Prozent oberhalb. Diese zwei Prozent könnten dabei zum Beispiel Ausreißer darstellen. Das $\hat{Q}_{(0,98)}$ ist also robust gegenüber den zwei Prozent an Ausreißern innerhalb der zu überprüfenden Daten oder der verwendeten Referenz (HÖHLE & HÖHLE, 2009). Die Quantile $\hat{Q}_{(0,683)}$ und $\hat{Q}_{(0,95)}$ werden von HÖHLE & HÖHLE (2009) aufgeführt, da sie entsprechend der verbreiteten „68-95-99,7-Regel“, der „Empirischen Regel“, fast den Standardabweichungen σ und 2σ vom Mittelwert einer Normalverteilung entsprechen. (RUNKLER, 2009)

Nmad

Der Nmad ist ein robustes Maß zum Einschätzen der Abweichung bzw. der Standardabweichung zweier Datensätze. Er basiert auf dem MAD, welcher sich wie folgt definiert (HÖHLE & HÖHLE, 2009; HOAGLIN ET AL., 2000):

$$MAD = \text{median}_j(|\Delta h - \text{median}(\Delta h)|) \quad (12)$$

Des Weiteren berechnet sich der Nmad durch:

$$Nmad = 1,4826 * MAD \quad (13)$$

Mit Hilfe des konstanten Skalierungsfaktors K wird der Median der absoluten Abweichung (MAD) normalisiert. Dadurch wird der Nmad zu einem guten Schätzer für die globale Standardabweichung, sofern die Fehler normalverteilt sind. Diese Beziehung, sowie der Faktor 1,4826 für K wurde dabei erstmals von Carl Friedrich Gauss erforscht. Der Faktor hängt mit der Wahrscheinlichkeit an einer bestimmten Stelle der inversen kumulativen Verteilungsfunktion zusammen. Näheres dazu kann in DAVID, (1998) nachgesehen werden.

Folgendes Beispiel soll die Funktionsweise des MAD bzw. Nmad verdeutlichen:

2	3	9
4	0	50
12	1	3

Beispiel eines Differenzbildes,
als aufgereichte Wertereihe: [0 1 2 3 3 4 9 12 50], Median = 3

1	0	6
1	3	47
9	3	0

Absolute Abstände der Fehler zum Median,
als aufgereichte Wertereihe: [0 0 1 1 2 3 6 9 47], Median = 2

$$MAD = 2,$$

$$Nmad = 2,9652$$

Abbildung 25: Erläuterung des Nmad Fehlermaßes

In Abbildung 25 beträgt die Standardabweichung der Residuen 15,73. Betrachtet man also den Unterschied des Nmad zur Standardabweichung, kann man dadurch bereits feststellen, dass die Daten entweder Ausreißer besitzen, oder nicht normalverteilt sind.

Mittlere Abweichung

Die mittlere Abweichung beschreibt mit der Varianz σ^2 den Erwartungswert $\hat{\mu}$ einer Standardnormalverteilung $N(\hat{\mu}, \sigma^2)$ und ist wie folgt definiert (HÖHLE & HÖHLE, 2009):

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2$$

Standardabweichung

Die Standardabweichung σ ergibt sich aus der Varianz σ^2 und kann für ein Bild aus Abweichungen Δh_n mit einer Anzahl von n Abweichungen und einem Erwartungswert bzw. mit einem systematischen Fehler $\hat{\mu}$ (Mean Error) wie folgt berechnet werden:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \hat{\mu})^2}$$

RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2}$$

Ebenso wie die Standardabweichung reagiert der RMSE sehr stark auf Ausreißer und wird dadurch so verfälscht, dass nur schwer eine Aussage über die Fehlerverteilung des gesamten Datensatzes geschlossen werden kann.

5.3 Berechnung der Testdaten

In diesem Abschnitt sollen die Arbeitsschritte, Prozesse und Software zusammengefasst werden, mit welchen die Testdaten prozessiert wurden. Dabei wird auf die verwendete SGM-Adaption nach D'ANGELO & REINARZ (2011) eingegangen, die besonders für die Prozessierung hochauflösender Satellitenbilder entworfen wurde. Die Testgebiete wurden mit Hilfe des vollautomatischen Prozessierungssystems „Catena“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt produziert. Dabei wurde mit Hilfe der Prozesskette „Multistereo“ ein Teil der Prozessierung durchgeführt. Die Multistereo-Prozesskette soll im folgenden Ablaufdiagramm kurz erläutert werden:

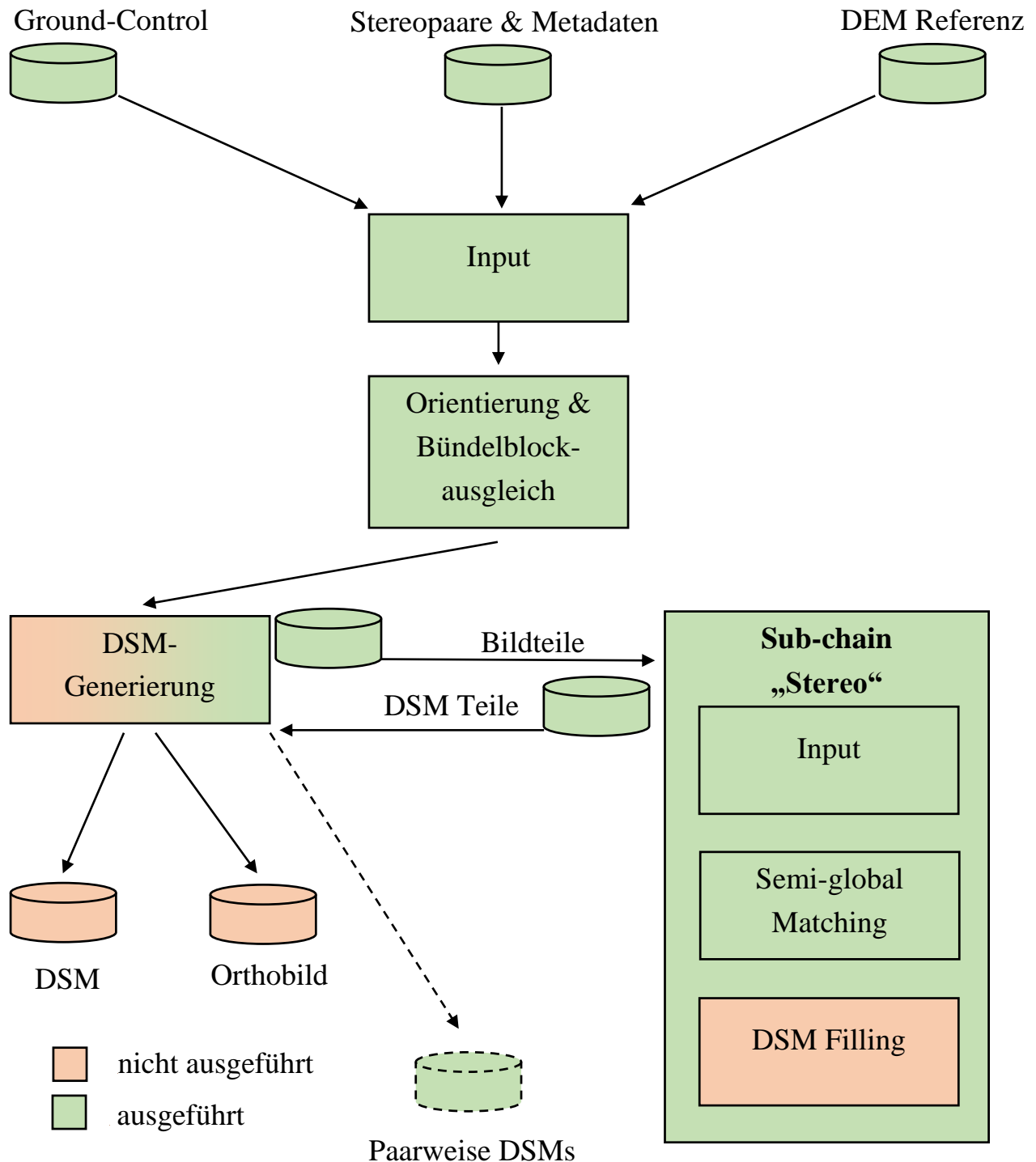


Abbildung 26: Ablaufdiagramm der Multistereoprozessierung in Catena
Erweitert nach KRAUß ET AL. (2013)

In der Abbildung 26 wird ersichtlich, dass nicht alle Schritte der Catena Prozessierungsschiene ausgeführt wurden. Das Ergebnis, ein finales DSM aus allen Eingangsdaten, sowie ein „True Ortho“, das mit Hilfe des finalen DSMs frei von Umklappeffekten sein soll, wurden nicht produziert. Auch eine Interpolation bzw. ein Füllen der Voidbereiche mit einem anderen Höhenmodell (z.B. SRTM) wurde nicht ausgeführt. Die Schritte wurden ausgelassen, da sie für die qualitative bzw. quantitative Analyse nicht relevant waren. Stattdessen wurden Zwischenergebnisse dafür verwendet. Diese

Zwischenergebnisse sind einzelne Höhenmodelle eines Matching von je zwei verschiedenen Bildern für alle Kombinationen.

Verwendete SGM Implementierung

Die SGM Implementierung, welche in der Catena-Prozesskette verwendet wird, ist in D'ANGELO (2010) „Image Matching and outlier Removal for large scale DSM Generation“ dokumentiert. Für die Berechnung der Testdaten wurden das MIC Ähnlichkeitsmaß, wie es bereits in dieser Arbeit in Kapitel 3.2.1 beschrieben wurde, verwendet. Dabei wurden für diese Prozessierung nur die panchromatischen Kanäle des Satelliten Worldview-2 verwendet. Für die Parametrisierung des SGM wurde eine Sensitivitätsanalyse mit den im IRSPS-Benchmark verfügbaren Worldview-2 Daten sowie der dort verfügbaren Lidar-Referenz durchgeführt.

Diese Paarweisen DSMs, in Abbildung 26 mit unterbrochener Kontur gekennzeichnet, wurden mit Hilfe der vorher festgelegten Testgebiete in einem Batch-Prozess ausgeschnitten, so dass für jedes Testgebiet Ausschnitte aller Paarweisen DSMs vorhanden sind.

Berechnung der Statistiken

Für die Fusion zweier oder mehrerer Einzelmatches, die quantitative Analyse, die Erstellung der Statistiken, die Erstellung der Plots und Ausgabe fusionierter Höhenmodelle, Differenzbilder und Referenzausschnitte wurde die Software Matlab der Firma Mathworks verwendet. Die dazu nötigen Routinen wurden in der Form einzelner Funktionen programmiert:

1. Funktion zum Einlesen aller Daten und Speicherung dieser in Datenstrukturen.
2. Hauptmodul: Angabe der zu testenden Matchingkombination, unter Angabe von Referenzdaten.
3. Funktion zur statistischen Analyse mit Ausgabe von Plots und fusionierten Matches.
4. Funktion zur Fusionierung zweier oder mehrerer Matches auf Grundlage des Median mit Ausgabe der Anzahl der eingeflossenen einzelnen Höhenwerte und Speicherung der Ergebnisse als kommagetrennte Datei.
5. Funktion zur Differenzbildung unter Berücksichtigung der Angabe einer Maske oder den gemeinsamen gematchten Bereichen der Referenz und des Samples.
6. Funktion zur statistischen Analyse aller Testgebiete ausgewählter Kombinationen.
7. Zahlreiche experimentelle Funktionen zur alternativen Fusionierung von Matches, sowie zur Erstellung von DTMs aus DSMs.
8. Funktion zur Interpolation von Voidbereichen.

Für die Visualisierung der Ergebnisse, sowie für die erstellten Karten, 3D-Ansichten und Ausschnitte wurde die GIS-Software GAFmap der Firma GAF AG verwendet.

6 ERGEBNISSE UND ANALYSE

Die Ergebnisse und Feststellungen der Testgebiete „Madrid“ und „Tripolis“, für die jeweils fünf Szenen verfügbar waren, werden in diesem Kapitel präsentiert. Dabei wird auf das entsprechende Testgebiet, klimatische Einflüsse und Eigenheiten eingegangen. Es werden verfügbare Referenzdaten vorgestellt und das Testgebiet wird in kleinere Ausschnitte geteilt, um eine bessere Handhabung zu ermöglichen. Diese Ausschnitte verschiedenartiger Ausprägung werden anschließend vorgestellt. Mit den Ausschnitten wird eine statistische Analyse bezüglich der Residuen zu den Referenzdaten durchgeführt, sowie eine Analyse der erreichten Vollständigkeit präsentiert. Die Testdaten werden anschließend in verschiedenen Kombinationen von across- und along-track Höhenmodellen visuell analysiert. Zum Ende wird für jedes der Testgebiete eine Zusammenfassung der Ergebnisse bzw. eine Ergebniseinschätzung abgegeben.

6.1 Testgebiet Madrid

Das Testgebiet liegt im Stadtbereich von Madrid. Da sich die eingeflossenen Szenen nur in einem etwa 1 km breiten und 10 km langen Streifen überlappen und nur dort Vergleiche verschiedener Szenenkombinationen möglich sind, wird nur dieser Bereich für die Analyse verwendet.

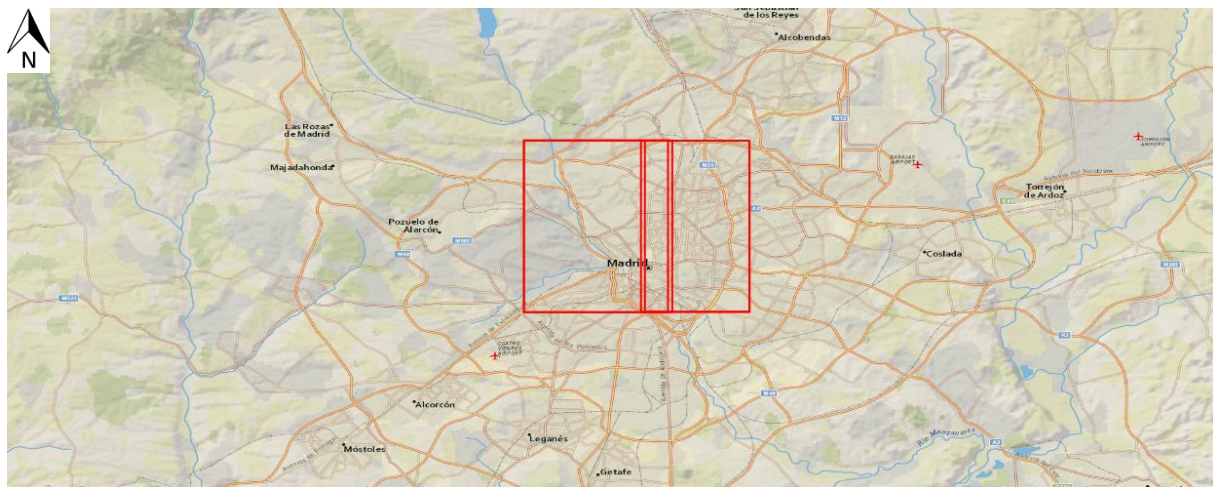
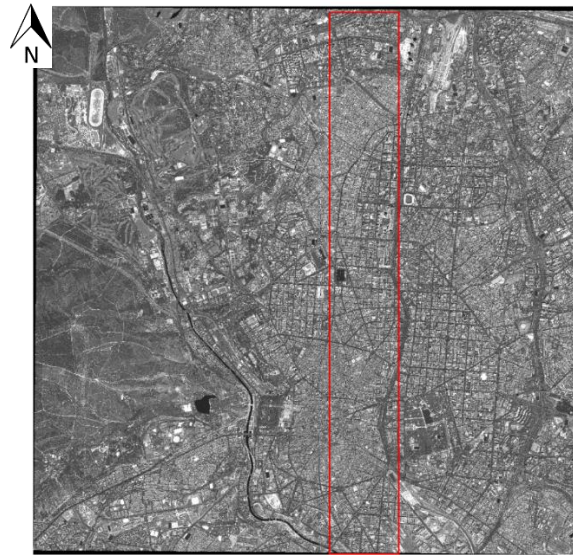


Abbildung 27: Footprints der Aufnahmen im Testgebiet Madrid
Hintergrund ESRI NatGeo World Map³⁵

³⁵ Beschreibung der NatGeo World map,
<http://www.arcgis.com/home/item.html?id=b9b1b422198944fbbd5250b3241691b6> (Aufgerufen 22.1.214)



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Abbildung 28: Lage des Streifens mit fünf überlappenden Szenen, Madrid
Hintergrund: Panchromatisches nadirnahes Bild

Der behandelte Streifen wird von einem stark besiedelten Innenstadtbereich dominiert. Der nördliche Bereich des Aufnahmestreifens beinhaltet zusätzlich Parks, Gebiete suburbaner Ausprägung sowie industriell geprägte Standorte.

6.1.1 Beschreibung der Testdaten

Eingeflossene Szenen und Kombinationen

Für die Testreihe standen fünf Szenen des Satelliten Worldview-2 zur Verfügung. Es handelt sich dabei um zwei Stereopaare und eine Monoaufnahme. Die Szenen wurden in Abständen von ein bis zwei Monaten aufgenommen. Folgende Tabelle und Grafik sollen eine Übersicht darüber geben, in welchen Winkeln und in welcher Beziehung die Aufnahmen zueinander stehen.

Tabelle 5: Metadaten der Aufnahmen

Bezeichnung	Aufnahmedatum	Azimuth [Grad]	Off-Nadir [Grad]
5	31.8.2013	71,9	15,4
6	31.8.2013	149,8	18,4
10	24.6.2013	143,1	3,8
7	2.6.2013	289,3	12,7
8	2.6.2013	259,1	13,6

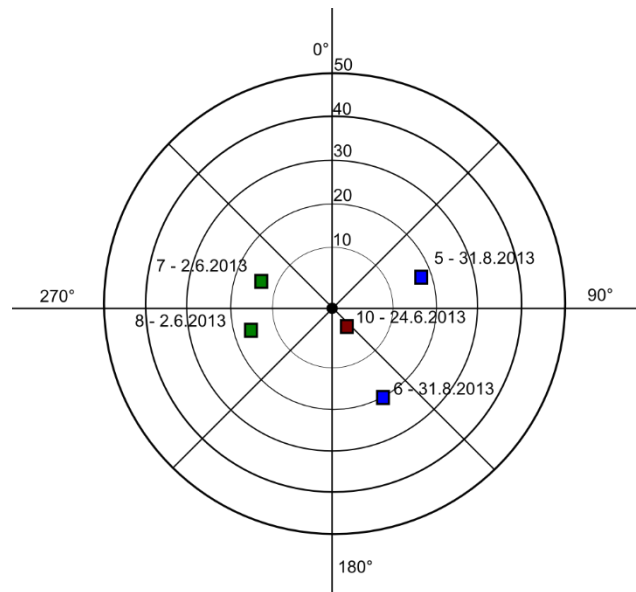


Abbildung 29: Aufnahmekonstellation des Testgebiets Madrid als Skyplot

Betrachtet man die Möglichkeit, im Gegensatz zu reinen Stereokombinationen, durch die Verwendung einer dritten Szene, welche im Nadir aufgenommen ist, eine Triplet-Aufnahme zu kombinieren, scheint die Winkelkombination vielseitiger. Es fließen Kombinationen mit niedrigen und hohen Konvergenzwinkeln ein, welche jeweils ihre Vor- und Nachteile besitzen. Bei der Verwendung von Archivaufnahmen ergeben sich, wie im Kapitel Tasking beschrieben, weitere Kombinationsmöglichkeiten. Besonders gut fallen die Konvergenzwinkel der einzelnen Paare auf, wenn man Kombinationen von allen drei Daten, 2. Juni - 24. Juni - 31. August, verwendet. Dabei entstehen Kombinationen wie etwa 10-7-6, 10-8-5 oder etwas schlechtere wie 10-7-5 bzw. 10-8-6. Da in diesem Testgebiet besonders die Kombination derjenigen Triplets, welche aus Daten verschiedener Zeitpunkte zusammengesetzt sind, vielversprechend ist, soll in der Analyse auch auf diese Konfiguration besonders eingegangen werden. Die Kombinationen sind zudem ein hervorragendes Beispiel für Höhenmodelle, welche aus Archivdaten mit drei verschiedenen Aufnahmedaten erzeugt wurden. Ebenfalls sehr günstig erweist sich die Tatsache, dass durch die Stereoaufnahmen unterschiedliche Triplet-Kombinationen verglichen werden können. Es ist somit möglich, auch Kombinationen von along-track Stereopaaren mit der Ergänzung einer Monoaufnahme zu testen, was ebenfalls einem interessanten praktischen Fall der Kombination aus Archivaufnahmen entspricht. In folgender Tabelle sind die Kombinationen der Einzelaufnahmen aufgeführt, welche im Testgebiet Madrid analysiert werden sollen:

Tabelle 6: Übersicht über die möglichen Kombinationen, ihre Stereowinkel und Aufnahmezeitpunkte

Kombination	Konvergenzwinkel [Grad]	Asymmetrie [Grad]	BIE [Grad]	Temporaler Unterschied [Monate]
5-6	23,69	2,75	75,03	-
5-7	29,79	1,60	84,64	~3
5-8	32,42	1,01	88,55	~3
6-7	32,70	3,41	83,13	~3
6-8	29,25	3,33	79,19	~3
7-8	7,66	1,98	75,76	-
5-10	16,37	8,55	80,46	~2,2
6-10	16,39	12,41	77,58	~2,2
7-10	17,92	5,14	84,52	~0,8
8-10	17,51	6,12	83,03	~0,8
10-8-7				
7-10	17,92	5,14	84,52	~0,8
8-10	17,51	6,12	83,03	~0,8
7-8	7,66	1,98	75,76	-
10-8-5				
8-10	17,51	6,12	83,03	~0,8
5-10	16,37	8,55	80,46	~2,2
5-8	32,42	1,01	88,55	~3
10-6-5				
6-10	16,39	12,41	77,58	~2,2
5-10	16,37	8,55	80,46	~2,2
5-6	23,69	2,75	75,03	-
10-6-7				
6-10	16,39	12,41	77,58	~2,2
7-10	17,92	5,14	84,52	~0,8
7-6	32,70	3,41	83,13	~3
10-7-5				
7-10	17,92	5,14	84,52	~0,8
5-10	16,37	8,55	80,46	~2,2
5-7	29,79	1,60	84,64	~3
10-8-6				
8-10	17,51	6,12	83,03	~0,8
6-10	16,39	12,41	77,58	~2,2
6-8	29,25	3,33	79,19	~3

Die Kombinationen lassen sich in folgende Gruppen bzw. Untergruppen gliedern:

- Triplet-Aufnahmen
 - Kombination aus along-track Stereo + Monoaufnahme
 - 10-8-7, 10-6-5
 - Kombination aus Monoaufnahmen
 - 10-8-6, 10-7-5, 10-6-7, 10-8-5
- Stereo-Aufnahmen
 - along-track Stereo
 - 5-6, 8-7
 - Cross-track Stereo
 - 5-7, 5-8, 5-10, 6-7, 6-8, 6-10, 7-10, 8-10

Klimatische Einflüsse

Klimadiagramm von Madrid

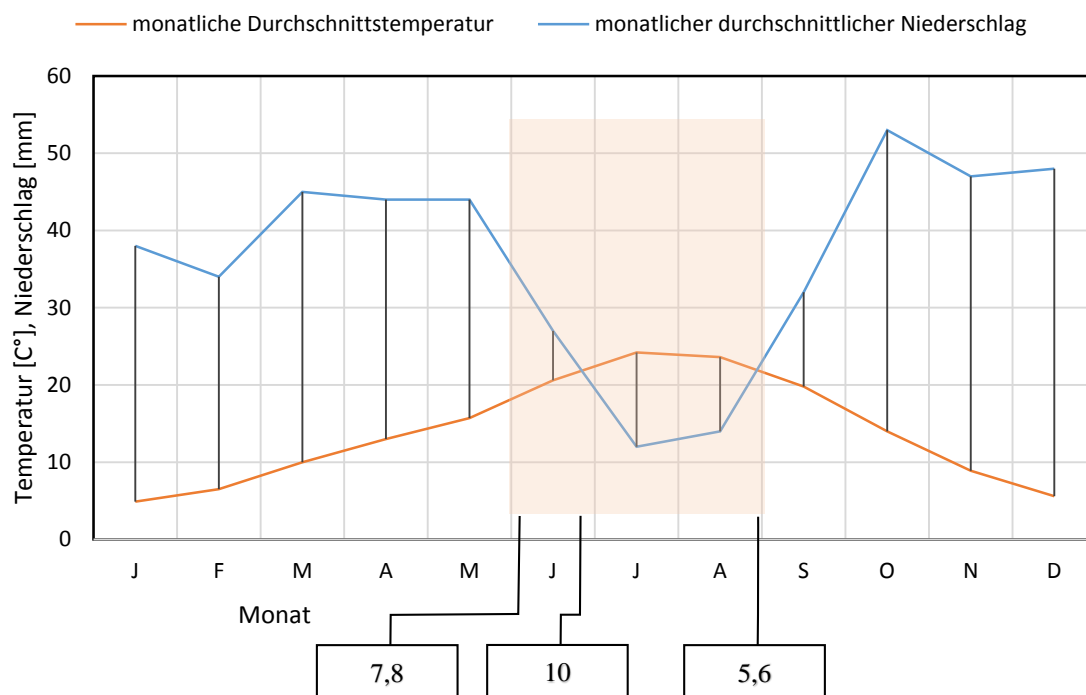


Abbildung 30: Klimadiagramm von Madrid mit Aufnahmezeitpunkten der Satellitenbilder

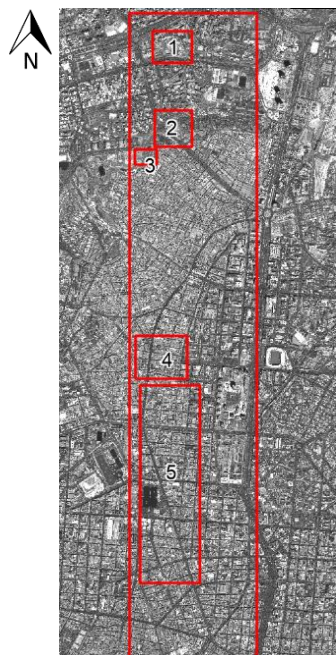
Die Testdaten befinden sich im Hoch und Spätsommer in einer sehr trockenen Periode zwischen Juni und September. Insbesondere zwischen den Aufnahmen 10 und 5 bzw. 6 fällt fast gar kein Regen, was sich besonders auf Rasenflächen oder Feldfrüchte auswirkt, die nicht bewässert werden. Die natürlicherweise vorherrschende mediterrane Vegetation im Bereich um Madrid ist der extremen Trockenheit dieser zwei Monate angepasst.

Behandelte Ausschnitte

Für die Analyse wurden fünf Ausschnitte verschiedener Ausprägung ausgewählt. Möglichst viele verschiedenartige Features (Objekte), wie beispielsweise Vegetation, Straßenoberfläche, Industriegebäude oder Gebäude mit Schrägdach bestimmen die Ausprägung eines Ausschnitts und sollen dadurch für diese Features repräsentative Resultate liefern. Im Folgenden soll kurz auf die einzelnen Ausschnitte eingegangen werden. Dabei soll verdeutlicht werden, welche Features sich primär in den einzelnen Abschnitten befinden und welche Bereiche bezüglich des Matchings eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit besitzen.

Tabelle 7: Übersicht über die behandelten Ausschnitte

Nummer in der Übersichtsgrafik	Bezeichnung des Ausschnitts	Größe
1	Park	761 * 635 Pixel bzw. 383 * 314 Meter
2	Kreuzung	735 * 683 Pixel bzw. 367 * 341 Meter
3	Freifläche	459 * 356 Pixel bzw. 229 * 178 Meter
4	Wohnviertel	1092 * 863 Pixel bzw. 546 * 431 Meter
5	Zentrum	1188 * 4001 Pixel bzw. 594 * 2000 Meter



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Abbildung 31: Übersicht der Ausschnitte im Testgebiet Madrid
Hintergrund: Nadirnahes Orthobild

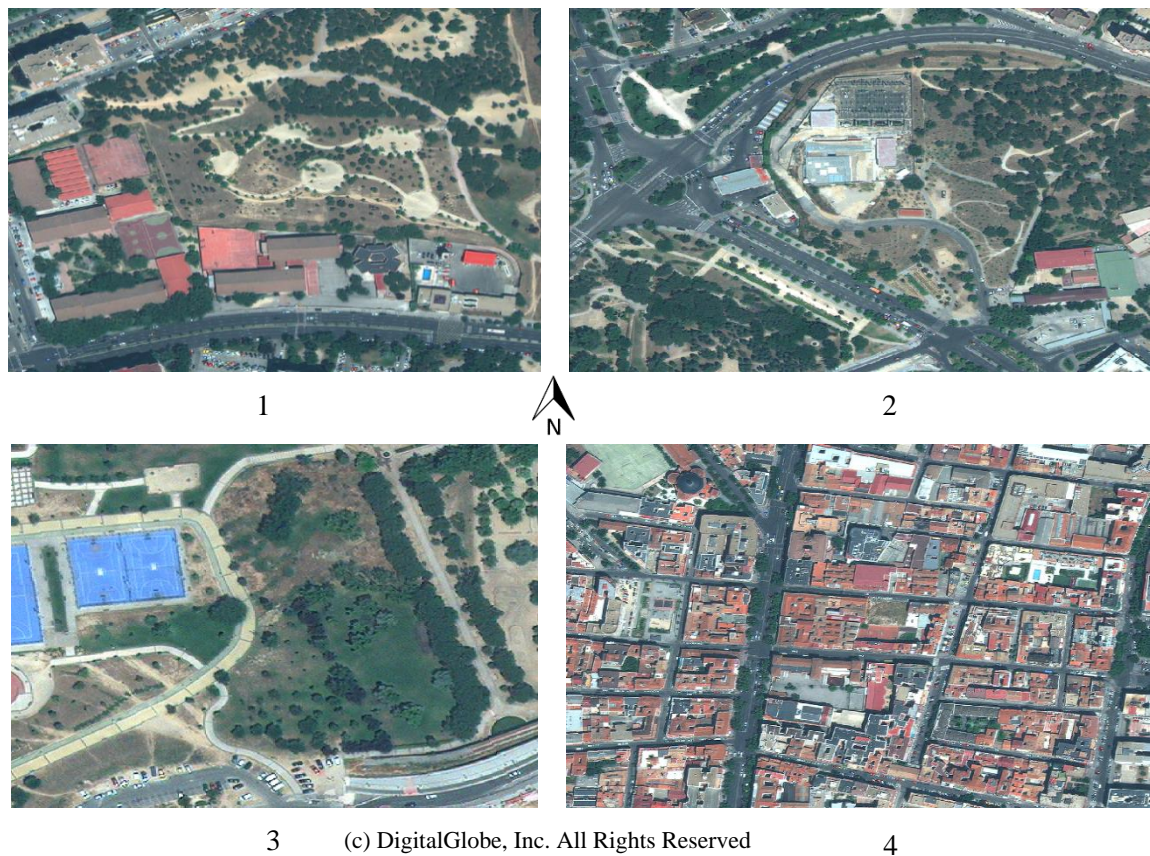


Abbildung 32: Detailansicht der Ausschnitte des Testgebiets Madrid

- 1: Ausschnitt „Park“
- 2: Ausschnitt „Kreuzung“
- 3: Ausschnitt „Freifläche“
- 4: Ausschnitt „Wohnviertel“



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Abbildung 33: Ausschnitt "Zentrum"

1. Park

Der Ausschnitt Park beinhaltet eine Vielzahl verschiedener für suburbane Gebiete typische Objekte. Etwa die Hälfte des Ausschnitts ist mit einer Parkfläche bedeckt, welche sich durch Baumbestand, Freiflächen mit sandigem Untergrund und Rasenflächen definiert. Im südlichen Teil des Ausschnitts befindet sich eine achtspurige Straße. Oberhalb der Straße befindet sich ein Sportzentrum, welches sich aus langgezogenen Hallen mit Schrägdächern und Sportplätzen zusammensetzt. Im nördlichen Teil existieren noch zwei Gebäude mit Flachdach, welche an eine Nebenstraße angebunden sind.

2. Kreuzung

Der Ausschnitt Kreuzung wird durch einen großen Kreuzungsbereich, in dessen Mitte sich ein großer Kreisverkehr befindet, dominiert. Die Bebauung kann als industriell bezeichnet werden und ist von Hallen im Südosten und durch ein Umspannwerk im Zentrum geprägt. Der übrige Bereich ist von Parkflächen mit Wegen und Freiflächen mit Büschen, Bäumen und Rasen bedeckt.

3. Freifläche

Im Ausschnitt Freifläche dominiert ein Parkareal im Zentrum. Im Westen des Ausschnitts befinden sich Sportplätze. Der Parkbereich ist durchzogen von Wegen für Besucher und ist etwa zur Hälfte mit Bäumen bedeckt.

4. Wohnviertel

Ein Wohnviertel mit dichter Blockbebauung und heterogenen Gebäudetypen charakterisiert den Ausschnitt Wohnviertel. Verschiedenartige Gebäude mit unterschiedlichsten Dachformen dominieren das Bild. Etwa ein Viertel der Oberfläche sind Straßen. Die übrige Oberfläche zieren Gebäude.

5. Zentrum

Dieser sehr große Ausschnitt beinhaltet alle Arten von Gebäuden, in dichter, blockartiger Bebauung. Größere Freiflächen sind nur durch Plätze oder Kreuzungen gegeben. Die einzige Vegetation stellen Bäume am Straßenrand oder an Plätzen dar. Im Westen des Ausschnitts ist ein künstlich angelegter See abgebildet.

Referenzdaten

Für das Testgebiet steht flächendeckend ein digitales Geländemodell bereit, welches aus Lidar-befliegungen des spanischen geographischen Instituts IGN (Instituto Geográfico Nacional) abgeleitet wurde. Das IGN gibt für die Punkte, welche durch eine Befliegung mit einem Lidar-Instrument abgeleitet wurden, eine Genauigkeit von 20 cm für das Produkt „MDT05“ an. Das Modell besitzt eine Maschenweite von 5 Metern. Laut der Produktbeschreibung³⁶ wurden für die Ableitung des digitalen Geländemodells aus dem zuvor vorliegenden digitalen Oberflächenmodell unter anderem hochauflösende optische Daten der Befliegungen der spanischen Kampagne „Plan Nacional de

³⁶ Lidar Geländemodell, <http://www.ign.es/PNOA/mdt.html> (Aufgerufen 16.12.2013)

Ortofotografia Aérea“ (PNOA) mit 25 bzw. 50 cm Pixelgröße verwendet, um Features wie Gebäude und Vegetation auszumaskieren. Da weder first- oder last Pulse-Daten, noch full-waveform Laserdaten vorliegen, sondern nur ein ASCII Grid, eine Liste mit Koordinatenpaaren und Höhenwerten, lässt sich das Höhenmodell nur in Bereichen ohne Vegetation und Gebäuden als valide Referenz einsetzen. Beachtet man unter Berücksichtigung der Maschenweite von 5m des Lidar-Höhenmodells einen Bereich, der eindeutig auf dem Boden liegt, kann ein solches Modell als Referenz für solche Bereiche verwendet werden. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden auf der Lidar-Referenz eben solche Bereiche maskiert. Für alle Berechnungen der statistischen Analysen, welche auf das Lidar-Höhenmodell zurückgreifen, liegen Masken vor, welche durch manuelle Maskierung dieser Bereiche erstellt wurden.

Anpassung der Referenzdaten

Da sich die in dieser Arbeit berechneten Höhenmodelle in ihrem Höhenbezug auf das Geoid EGM96 und nicht auf das Europäische Terrestrische Referenzsystem ETRS89 (Ellipsoidale Höhe) beziehen, muss der Höhenbezug vor der Verwendung der Daten an die lokal vorherrschende Undulation angepasst werden. Dies wurde durch eine Korrektur der Höhen mit den im Gebiet des Lidar Geländemodells vorherrschenden Differenzen durchgeführt. Dazu wurde mit Hilfe der Geoid Kalkulationsprogramme bzw. der Geoid-Dateien der NGA³⁷ eine Korrektur der Höhen des Referenzmodells vorgenommen. Die Höhen zur Korrektur der Geoundulation liegen dabei in einem 15`` auflösenden Rasterformat vor.

Betrachtet man die Referenzdaten genauer und überlagert sie mit den pangeschärften Daten der verwendeten Worldview-2 Szenen, fällt auf, dass die Maskierung zur Erstellung des digitalen Geländemodells nicht immer optimal verlaufen ist. Auch aus diesem Grund wäre die Verwendung des Lidar-Geländemodells ohne Maskierung eine Inkonsistenz und würde zu verfälschten Ergebnissen führen.

³⁷ <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html> (Augerufen 20.1.2014)

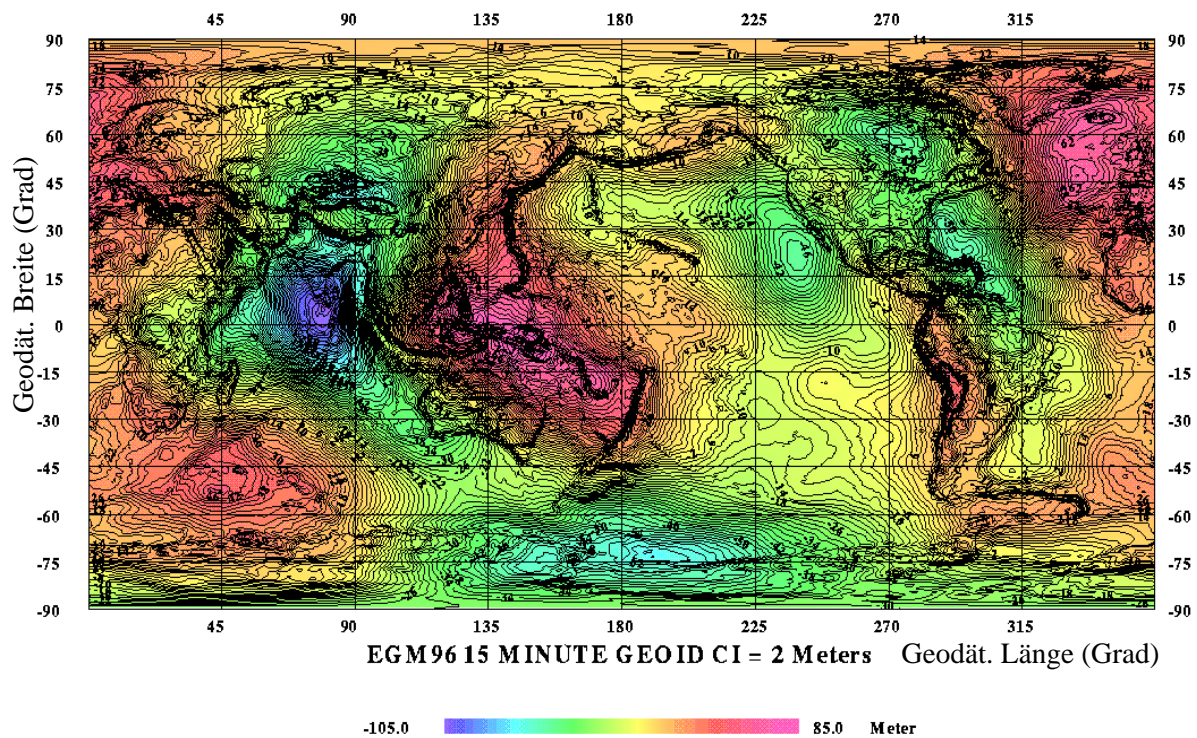
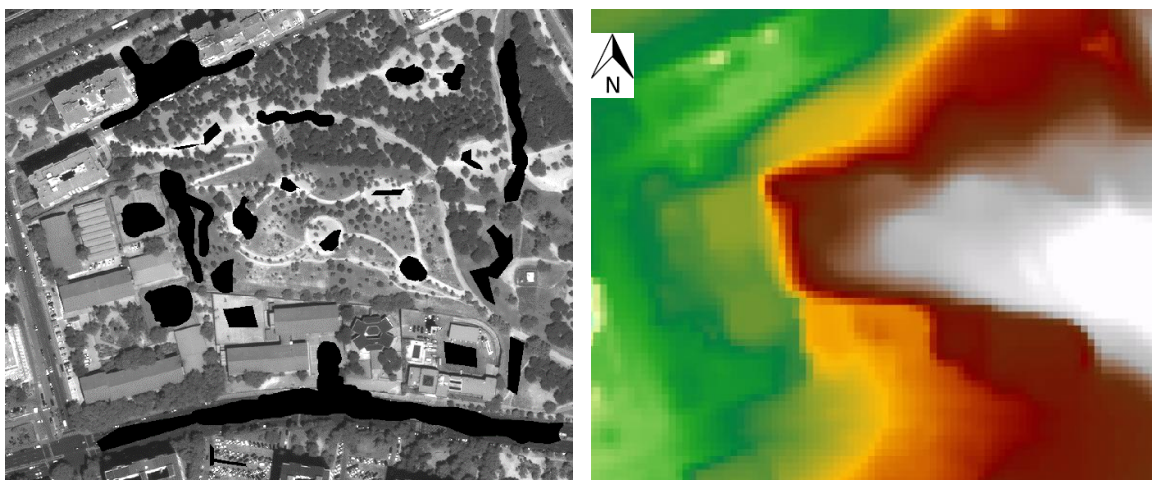


Abbildung 34: Plot des EGM96 Geoids
NGA September 1991, Quelle: NGA Geoid Internetseite³⁸

Die manuelle Maskierung wurde wie Abbildung 35 interaktiv durchgeführt, um Kanten des verhältnismäßig sehr groben 5 Meter auflösenden Geländemodells nicht in die Maskierung aufzunehmen. Da eine Maskierung nicht mit Rücksicht auf jede Kante vorgenommen werden kann, wird, wie in Kapitel 5.2.2 bereits beschrieben, auf robuste Statistiken zurückgegriffen, um Häuserkanten, Bäume oder ähnliche Features, welche partiell fälschlicherweise in die Maske übernommen wurden, aus der Statistik auszuschließen.



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Abbildung 35: Ansicht des Lidar-Modells und eines maskierten Bereichs
Links: Schwarz: Maske der bodennahen Flächen
Hintergrund: Nadirnahes Orthophoto
Rechts: Eingefärbte Lidar-Referenz, Streckung auf 2-fache Standardabweichung
©INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL DE ESPAÑA

³⁸ <http://earth-info.nga.mil/GandG/images/ww15mgh2.gif> (Augerufen 20.1.2014)

Zusätzliche Vergleiche

Neben dem vorgestellten Lidar-Geländemodell soll Mangels weiterer Referenzdaten eine weitere Quelle als Referenz vorgestellt und getestet werden. Gerade weil durch das Lidar-Geländemodell keine Analyse des gesamten Ausschnittsbereichs möglich ist, sondern nur eine Untersuchung der Bodenbereiche zulässt, ist es nötig, weitere Referenzdaten für die Untersuchung von anthropogenen Objekten und Vegetation zu haben. Wie in Abbildung 36. zu erkennen ist, weist das Geländemodell eine fragwürdige Qualität bezüglich der Entfernung anthropogener Objekte auf. Es wurde bei der Maskierung darauf geachtet, diese Objekte weder in der Referenz noch in den Probedaten in der Maske einzuschließen. Aus diesem Grund wird in der statistischen und visuellen Analyse der Modelle versucht ein einzelnes Stereopaar zu finden, welches sowohl die besten Eigenschaften bezüglich der Abbildung als auch eine möglichst geringe Abweichung zum Lidar-Geländemodell besitzt. Es stellt sich in der Analyse heraus, dass die in-track-Kombination 5-6 das plausibelste und beste Ergebnis liefert.

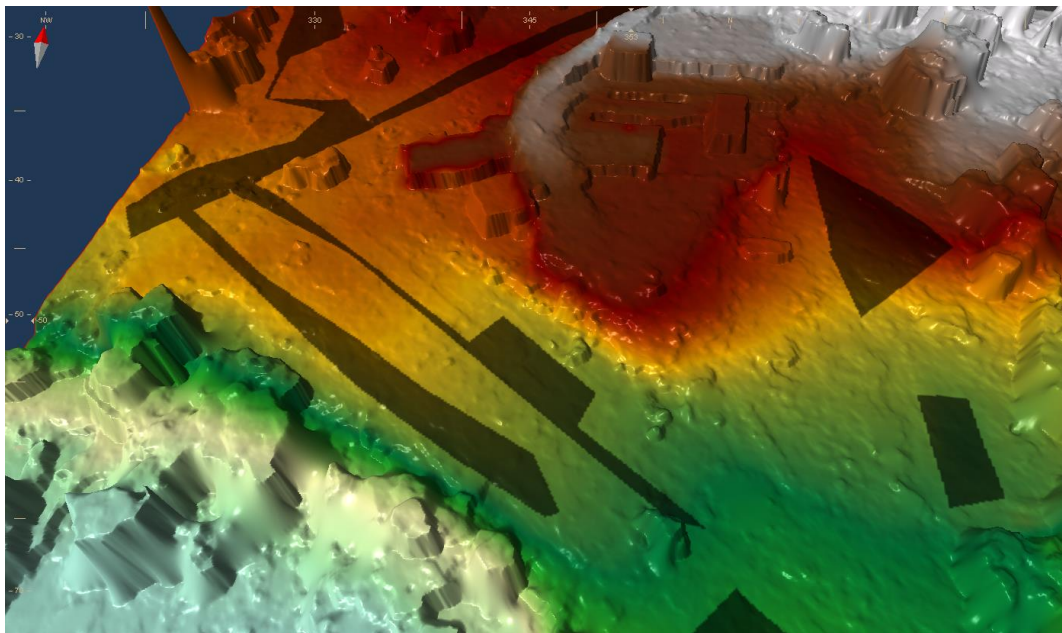


Abbildung 36: 3D-Schrägsicht des Testausschnitts „Kreuzung“
Streckung: 2-fache Standardabweichung
Dunkle Einfärbung: Maske bodennaher Bereiche

Es tritt bei Stereopaar 5-6 beim Vergleich mit einer Triplet-Kombination, welche das Stereopaar 5-6 bereits enthält, eine statistische Abhängigkeit auf. Vergleicht man Daten trotz einer statistischen Abhängigkeit, muss gewährleistet sein, dass diese statistische Abhängigkeit in den Ergebnissen berücksichtigt wird. Nachdem im Folgenden das Stereopaar 5-6 auf systematische Abweichungen zum Lidar-Geländemodell in bodennahen Bereichen überprüft wird, wird es für die übrigen Kombinationen als flächendeckende Referenz verwendet.

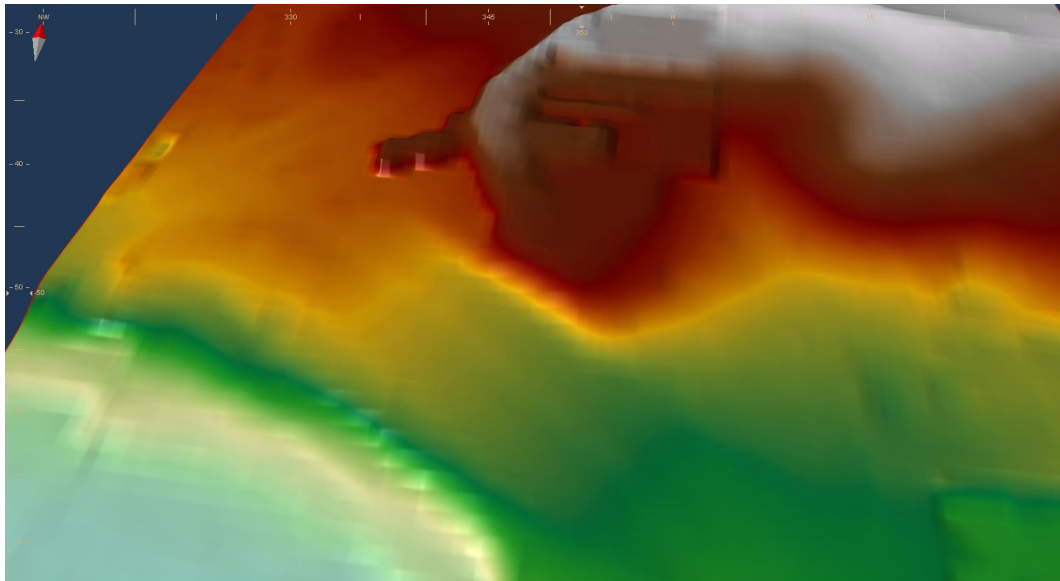


Abbildung 37: 3D-Schrägansicht des Lidar-Geländemodells
 Streckung: 2-fache Standardabweichung
 ©INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL DE ESPAÑA

Da es im Höhenmodell 5-6, in der Nähe des linken Randbereichs, in den Testgebieten Wohngebiet, Freifläche und Zentrum zu starken Artefakten kommt, wurden in den entsprechenden Bereichen in den Gebieten „Zentrum“, „Wohnviertel“ und „Freifläche“ Artefakte ausmaskiert (Abbildung 38). Für den Vergleich wurden keine interpolierten bzw. gefüllten Höhenmodelle, sondern nur rekonstruierte Höhen verwendet.

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

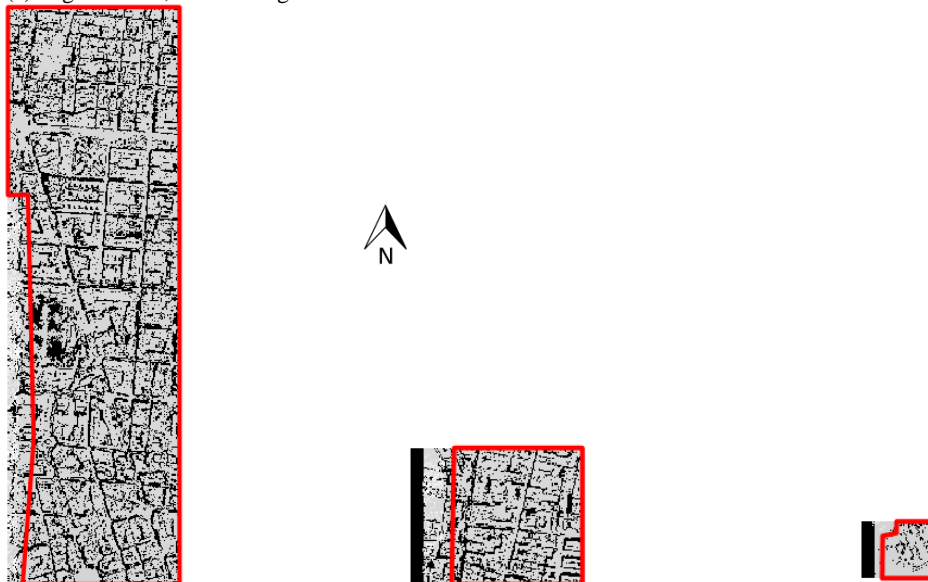
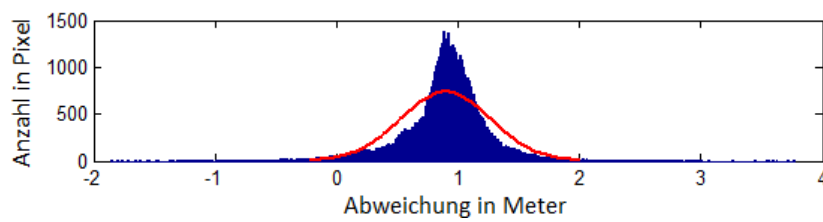


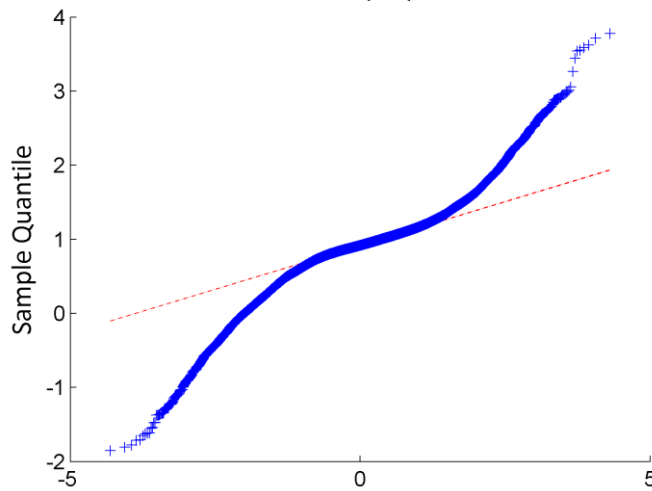
Abbildung 38: Zusätzliche Maskierung einzelner Ausschnitte
 Links: „Zentrum“,
 Mitte: „Wohnviertel“
 Rechts: „Freifläche“
 Roter Rahmen: Maske
 Hintergrund: Höhenmodell 5-6 mit Voidbereichen

Die rot eingerahmten Bereiche wurden für eine flächendeckende Analyse herangezogen. Nicht rekonstruierte Bereiche sind in schwarz erkennbar.

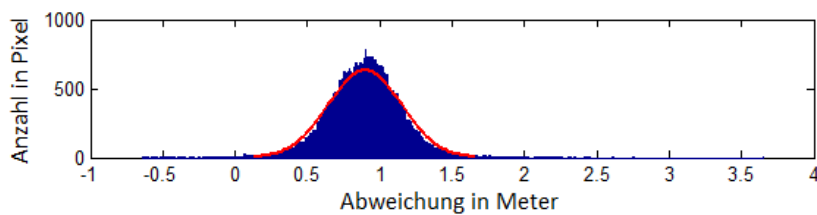
Abweichungen des Höhenmodells 5-6 zum Lidar Geländemodell in maskierten bodennahen Bereichen



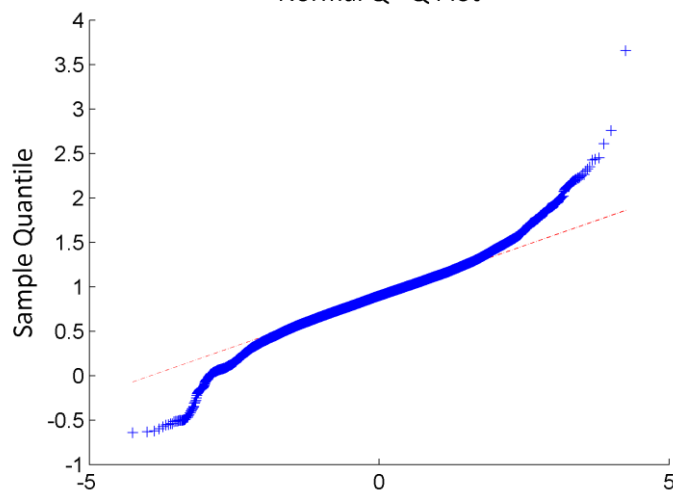
Normal Q - Q Plot



Quantile der Normalverteilung



Normal Q - Q Plot



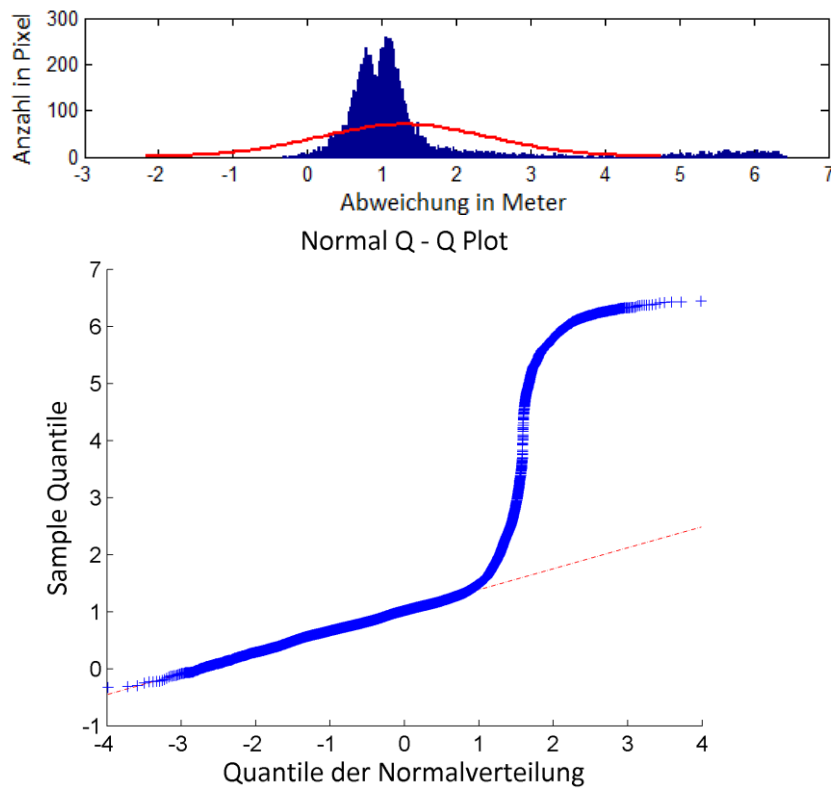
Quantile der Normalverteilung

1 - Park

Maß	Wert [m]
Mean	0,89
Std. Abweichung	0,37
Median	0,91
Nmad	0,23
Quantil (95%)	1,43
Quantil (68,3%)	1,03
Rmse	0,97

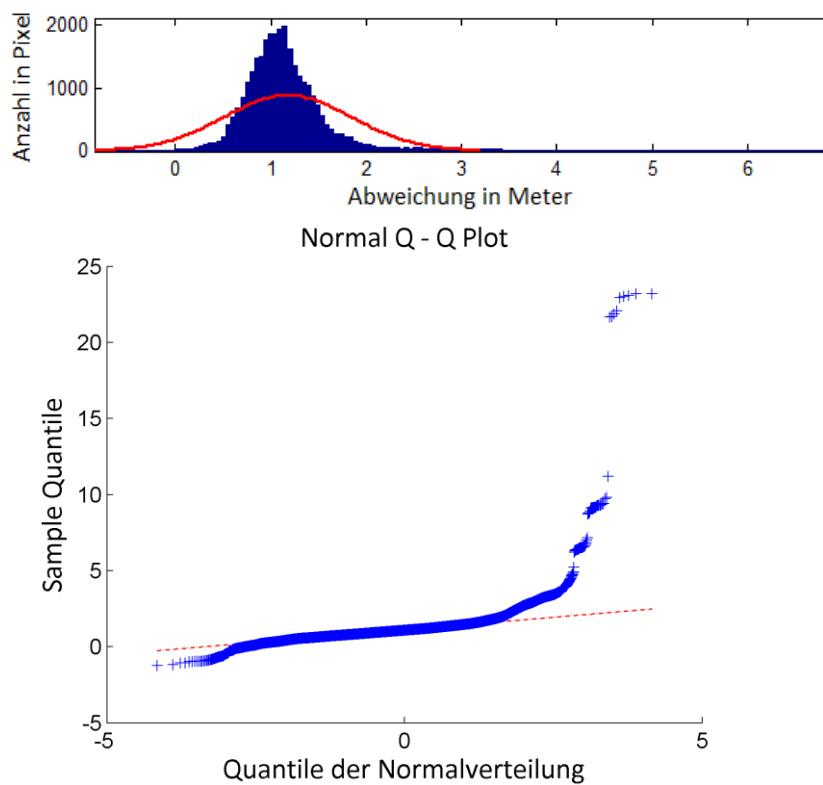
2 – Kreuzung

Maß	Wert [m]
Mean	0,89
Std. Abweichung	0,25
Median	0,90
Nmad	0,22
Quantil (95%)	1,29
Quantil (68,3%)	1,00
Rmse	0,93



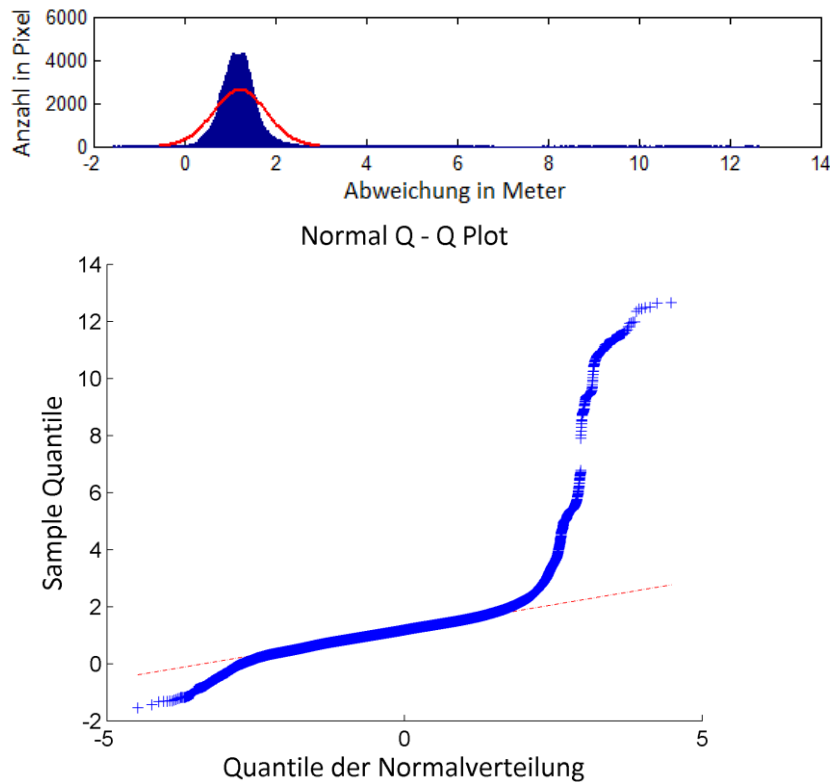
3 – Freifläche

Maß	Wert [m]
Mean	1,30
Std. Abweichung	1,16
Median	1,02
Nmad	0,36
Quantil (95%)	4,87
Quantil (68,3%)	1,17
Rmse	1,74



4 – Wohnviertel

Maß	Wert [m]
Mean	1,18
Std. Abweichung	0,67
Median	1,09
Nmad	0,33
Quantil (95%)	1,99
Quantil (68,3%)	1,25
Rmse	1,36



5 – Zentrum

Maß	Wert [m]
Mean	1,22
Std. Abweichung	0,59
Median	1,18
Nmad	0,35
Quantil (95%)	1,88
Quantil (68,3%)	1,35
Rmse	1,36

Abbildung 39: Histogramme, QQ Plots, Abweichungen der Testgebiete sowie statistische Maße der Abweichungen von den Referenzdaten in den einzelnen Testgebieten

Betrachtet man die Residuen der Oberflächen, zeigt sich, dass alle Residuen annähernd eine Normalverteilung aufweisen. Die Normalverteilungen, welche in den Plots in rot dargestellt sind, weichen auf Grund von Ausreißern insbesondere in den Testgebieten „Wohnviertel“ und „Freifläche“ von den entsprechenden Lidar-Daten ab. Die erhöhte Standardabweichung durch die Ausreißer und die weit streuenden Minima und Maxima der Residuen bewirken die Abflachung des Modells. Die Oberflächen weichen im Mittel etwa 1,1 m in positiver Richtung vom Lidar-Geländemodell ab. Die Oberfläche des Oberflächenmodells liegt auch nach visueller Kontrolle über das gesamte Modell etwa einen Meter über dem Lidar-Geländemodell. Die Ausreißer in Testgebiet 3, 4 und 5 entstehen primär durch einzelne überlappende Ecken von Vegetation.

6.1.2 Statistische Analyse

Für die statistische Analyse soll zuerst unabhängig von den Referenzdaten auf die erreichte Vollständigkeit der einzelnen Kombinationen eingegangen werden. Später sollen die Abweichungen der einzelnen Höhenmodell-Kompositionen zu den Referenzmodellen präsentiert und diskutiert werden.

Vollständigkeit

Hinsichtlich der erreichten Vollständigkeit der Testkombinationen erreichen Stereokombinationen rund 20 - 30 Prozent weniger vollständige Höhenmodelle als Triplet-Kombinationen. Dies ist im urbanen Bereich nicht verwunderlich und wird durch Verdeckungen verursacht.

Vollständigkeiten der vorgeschlagenen Kombinationen in den einzelnen Testgebieten

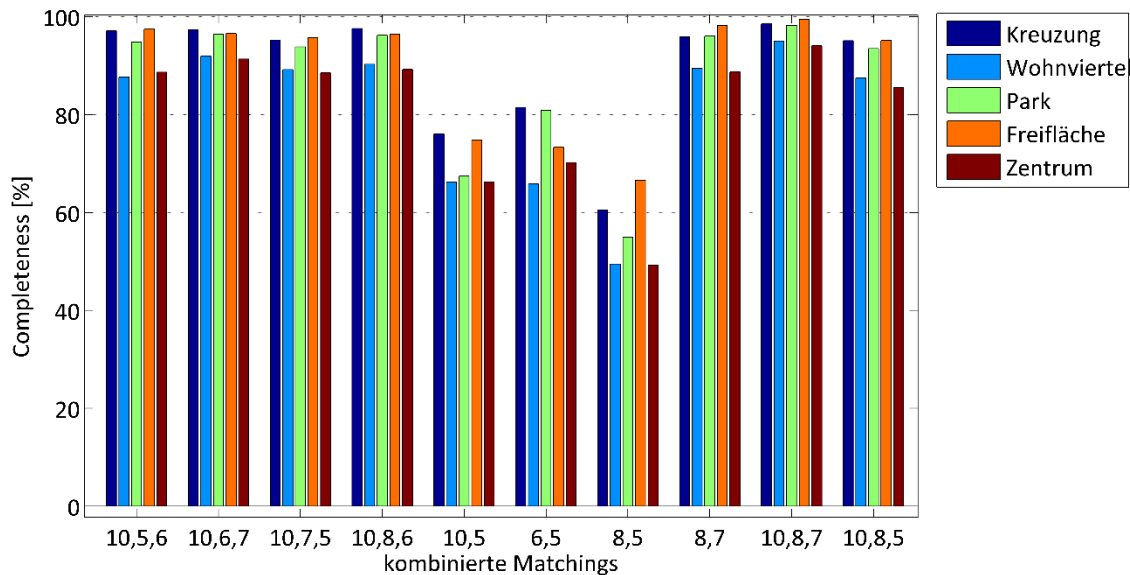


Abbildung 40: Vollständigkeiten der vorgeschlagenen Kombinationen

Auswirkungen der Aufnahmewinkel

Betrachtet man die Completeness (Vollständigkeit) der einzelnen Testgebiete, verhält es sich bei allen Kombinationen so, dass die Testgebiete Wohnvierteil und Zentrum die geringste Completeness besitzen. Für die übrigen Stereokombinationen wurde ebenfalls eine Analyse durchgeführt, welche jedoch keine weiteren Erkenntnisse ans Licht brachte. Diese beiden Testgebiete zeichnen sich durch eine dichte Stadtbauung aus – dies erklärt die fehlenden Matches in Häuserschluchten, Straßen und Innenhöfen, welche durch Verdeckungen entstehen. In Abbildung 41 ist ein Ausschnitt der Kombination 10-8-5 des Testgebiets „Innenstadt“ abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein großer Teil der fehlenden Matches in eben diesen Bereichen liegt. Deutlich wird auch, dass die fehlenden Matches der Kombination 10-8-5 in den nord-westlichen Bereichen liegen. Dieser Effekt lässt sich durch die Aufnahmegeometrie der Kombination erklären. Vereinfacht gesagt blickt der Satellit in allen Positionen aus von südosten auf das Ziel. Die Verdeckungen auf der nord-ost Seite der Gebäude sind aus diesem Grund nicht unnatürlich, sondern zu erwarten. Analog verhält es sich in allen anderen Kombinationen. Es fällt jedoch auf, dass der Unterschied zwischen der Completeness in flachen Bereichen (Kreuzung, Park, Freifläche) und der in Innenstadtbereichen (Wohnvierteil, Zentrum) in einigen Kombinationen nicht so groß ist, wie in anderen. Ebenso kann festgestellt werden, dass in reinen Stereopaaren das Verhältnis sehr viel größer ist, als in Triplet-Kombinationen. In der Praxis werden daher für die Abbildung von Stadtbereichen auch oftmals mehr als zwei Bilder verwendet. Bei den Triplet-Kombinationen lässt sich erkennen, dass dieses Verhältnis bei den Kombinationen 10-6-7, 10-7-5 und 10-8-7 minimal geringer ist.

Betrachtet man die zugehörigen Aufnahmepositionen, stellt sich heraus, dass bei eben diesen Kombinationen ein ähnlicher Effekt zu erkennen ist. Aufnahme 10 steht nicht komplett in der Nadirposition sondern mit 3,8 Grad Off-Nadir im zweiten Quadranten des Skyplots. Der Satellit blickt

somit leicht schräg vom süd-osten auf das Ziel. Untersucht man die übrigen Triplet-Kombinationen, fällt auf, dass bei diesen die Tendenz entsteht, dass die Aufnahmewinkel bis auf wenige Ausnahmen eine leicht unausgeglichene Kombination darstellen. Als unausgebalanciert kann man in diesem Fall das tendenzielle Fehlen einer Aufnahme aus einer nordwestlichen Richtung bezeichnen (speziell durch Aufnahme 7). Bei along-track Aufnahmen aus einem Tasking lassen sich die drei Aufnahmen im Optimalfall annähernd durch eine Gerade verbinden. Somit entstehen solche Asymmetrien im Allgemeinen nicht. Ausnahmen stellen selbstverständlich jene Bereiche dar, welche durch die orbitale Flugbahn des Satelliten nie im absoluten Nadir aufgenommen werden können. Bei der Verwendung von Szenen eines anderen Orbits ist es folglich essentiell, in urbanen Bereichen eine Kombination zu finden, welche eine harmonische bzw. ausgeglichene Aufnahmegeometrie aufweist. Diese muss nicht immer eine geradenähnliche Anordnung haben.

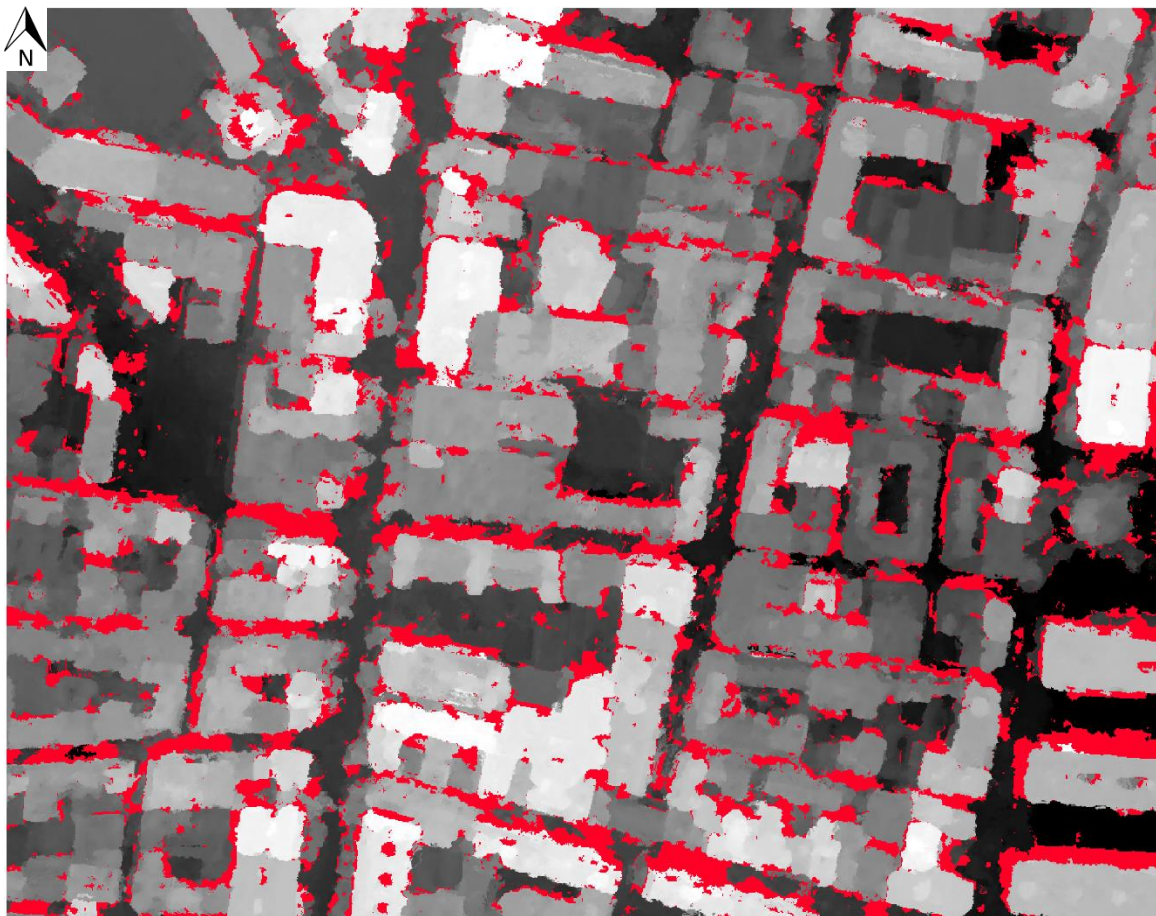


Abbildung 41: Beispiel für Verdeckte bzw. nicht gematchte Bereiche
Höhenmodell 10-8-5, auf 2-fache Standardabweichung gestreckt
Graustufen von schwarz (niedrig) bis weiß (hoch)
Rot: Voidbereiche

Neben den Verdeckungen an den Gebäuden, welche durch die Kombination des Aufnahmewinkels zu erklären sind, treten weitere Voidbereiche auf. Diese sollen jedoch im Abschnitt 6.2.5 „Visuelle Analyse“ behandelt werden.

Betrachtet man die gemittelten Vollständigkeitsraten in Tabelle 8 fällt auf, dass die Stereokombination 8-7 hinsichtlich ihrer Vollständigkeit mit den Triplet-Kombinationen mithalten kann. Dieser Effekt tritt durch die Nadirnähe, sowie durch den vergleichsweise geringen Konvergenzwinkel auf. Mit 97,04 %

Vollständigkeit erweisen sich die Kombination 10-8-7 zusammen mit der Kombination 10-7-6 in allen Testgebieten als bestes Ergebnis die Vollständigkeit betreffend.

Auswirkungen der Aufnahmezeitpunkte

Ebenso ist der Unterschied der Vollständigkeit zwischen urbanen und suburbanen Gebieten nicht sehr hoch. Dies weist diese Kombinationen für die Erstellung von urbanen Höhenmodellen, die sich durch heterogene Bebauung auszeichnen, als brauchbar aus. Auffällig ist dabei, dass sich bei der Kombination 10-7-5 um eine Szene aus drei Bildern verschiedener Aufnahmedaten handelt. Besonders für die Testgebiete „Park“ und „Freifläche“ würde man niedrigere Vollständigkeiten vermuten, da sich dort sehr viel Vegetation befindet. Betrachtet man die Aufnahmezeitpunkte der Aufnahme 10-8-7 sind diese gut vergleichbar mit der Kombination 10-6-5. Beide Kombinationen sind zusammengesetzt aus einem along-track Stereopaar und einer nadirnahen Aufnahme, welche nach beziehungsweise vor dem jeweiligen Stereopaar aufgenommen wurde. Die Aufnahmezeitpunkte der Kombination 10-8-7 liegen nicht so weit auseinander wie bei 10-6-5. Vermutlich erreicht 10-8-7 durch die Aufnahmewinkel eine höhere Vollständigkeit als 10-6-5. Eine ebenfalls hohe Homogenität sowie Vollständigkeit weist die Kombination 10-7-6 auf. Sie beinhaltet Aufnahmen aus drei verschiedenen Zeitpunkten. Ihre Aufnahmewinkel lassen sich annähernd auf einer Geraden anordnen, was sonst einer typischen optimalen along-track Aufnahmekomposition entspricht. Dennoch zeigen die Untersuchungen, dass durch die Kombination von drei Aufnahmen unterschiedlicher Zeitpunkte, Vollständigkeiten jenseits der 93 % möglich sind. Den Einfluss einzelner Features kann man, da die Verdeckungen, die durch die Aufnahmewinkel verursacht werden, den größten Anteil der Voidbereiche ausmachen, auf Ausschnitten mit großen Variationen von Bebauung, Vegetation und Freiflächen nur schwer feststellen. Welchen Einfluss einzelne Features auf die resultierende Vollständigkeit haben, soll in der visuellen Analyse genauer untersucht werden. Es ist deshalb auf grund der Größe und der Heterogenität der Testgebiete nicht möglich eine Aussage bezüglich des Einflusses der temporalen Unterschiede der Eingangsbilder zu treffen.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse

Kombination	10- 5-6	10- 7-6	10- 7-5	10- 8-6	10-5	6-5	8-5	8-7	10- 8-7	10- 8-5
Mean Completeness	93.12	94.72	92.49	93.93	70.14	74.33	56.17	93.63	97.04	91.32
Standard- abweichung der Completeness	4.67	2.83	3.42	3.87	4.84	6.77	7.45	4.26	2.34	4.54

Vertikale Abweichung zum Lidar-Geländemodell

Für die Analyse der vertikalen Abweichung Δh wird als erstes die Abweichung auf den ebenen Flächen in Bodennähe analysiert. Dazu wird das in 6.1.4 beschriebene Lidar-Geländemodell als Referenz herangezogen. Die vertikalen Abweichungen der einzelnen Testgebiete und Kombinationen zu diesem Modell werden im Folgenden präsentiert und analysiert. Da die Lidar-Referenz nur ein sehr niedrig aufgelöstes Modell ist, können die Ergebnisse nur bedingt als absolute Abweichungen gesehen werden.

Die Ergebnisse können durch prozessierungsbedingte Faktoren, wie zum Beispiel eine durch Resampling nötige Interpolation, beeinflusst werden. Es können somit beispielsweise Fehler an Kanten im Gelände entstehen.

Completeness – Nmad Plot

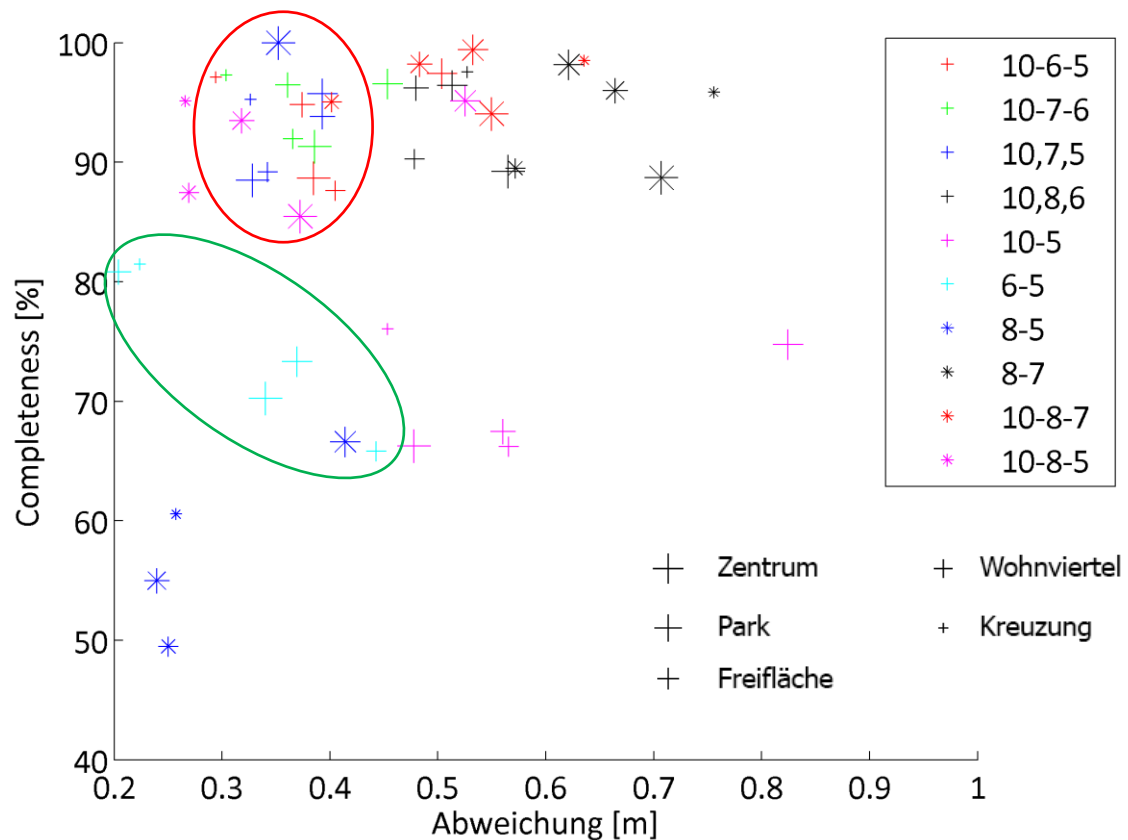


Abbildung 42: Plot der Vollständigkeit der Testgebiete sowie Nmad für das Maß der Nmad und der Completeness gegenüber des Lidar-Geländemodells

Betrachtet man zunächst die Stereokombinationen 8-5 (3 Monate Abstand) und im Besonderen die Kombination 6-5 (zeitgleich, in der Abbildung grün markiert) im Completeness/Nmad Plot, fällt auf, dass diese beiden Kombinationen sehr geringe vertikale Abweichungen besitzen. Dies kann auf ihren hohen Konvergenzwinkel zurückgeführt werden. Ebenso fällt die Kombination 8-7 auf, welche mit ihrem niedrigen Konvergenzwinkel von $7,66^\circ$ einen großen Anteil der Höhen rekonstruieren kann. Sie besitzt jedoch eine etwa um 0,4m höhere Abweichung zu den Kombinationen mit dem geringsten Fehler.

Die Triplets 10-7-5, 10-8-5 und 10-7-6 (in der Abbildung rot markiert) besitzen neben einer sehr guten Vollständigkeit in allen Testgebieten auch sehr geringe Abweichungen.

95 % Quantil Plot

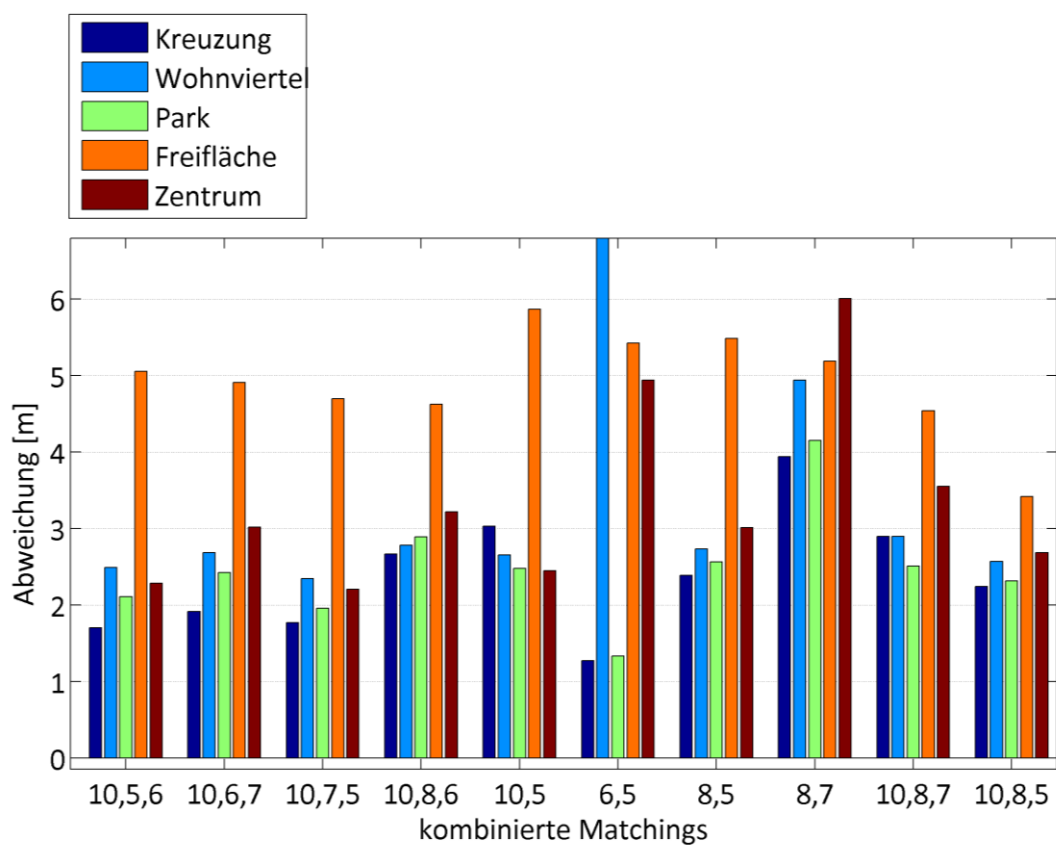


Abbildung 43: Plot der Ergebnisse der Testgebiete vs. Lidar, 95% - Quantil
Residuen zum Lidar-Geländemodell

68,3 % Quantil Plot

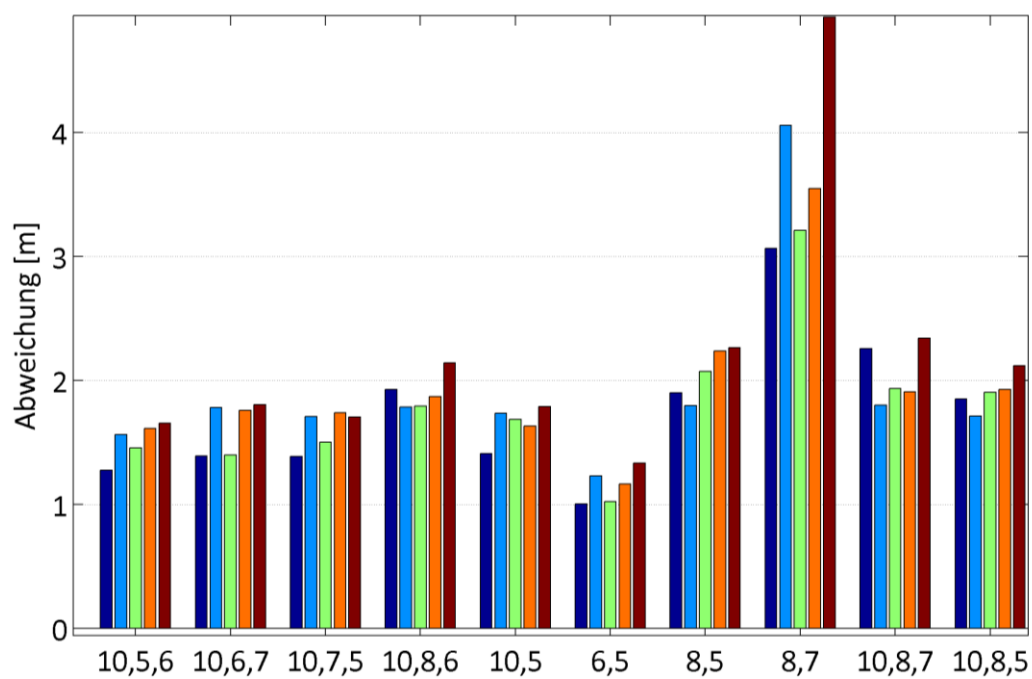


Abbildung 44: Plot der Ergebnisse der Testgebiete vs. Lidar, 68,3% - Quantil
Residuen zum Lidar-Geländemodell

In den Quantil-Plots in Abbildung 46 sind im 95 % Quantil im Testgebiet „Freifläche“ in allen Kombinationen starke Abweichungen zu erkennen. Es handelt sich dabei um eine Fehlmaskierung. Im 68,3 % Quantil sind die Abweichungen nicht mehr vorhanden. Im 95 % Quantil gibt es zusätzlich bei der Kombinationen 5-6 starke Abweichungen. Im Falle der Kombination 5-6 stellt sich heraus, dass es sich bei den Abweichungen um Artefakte an den Rändern der Testgebiete handelt, wie in Kapitel 6.1.4 bereits beschrieben wurde.

Großflächiger Vergleich

Im Folgenden werden die Ergebnisse des großflächigen Vergleichs der ausgewählten Stereokombinationen mit der Stereokombination 5-6 als Referenz verglichen.

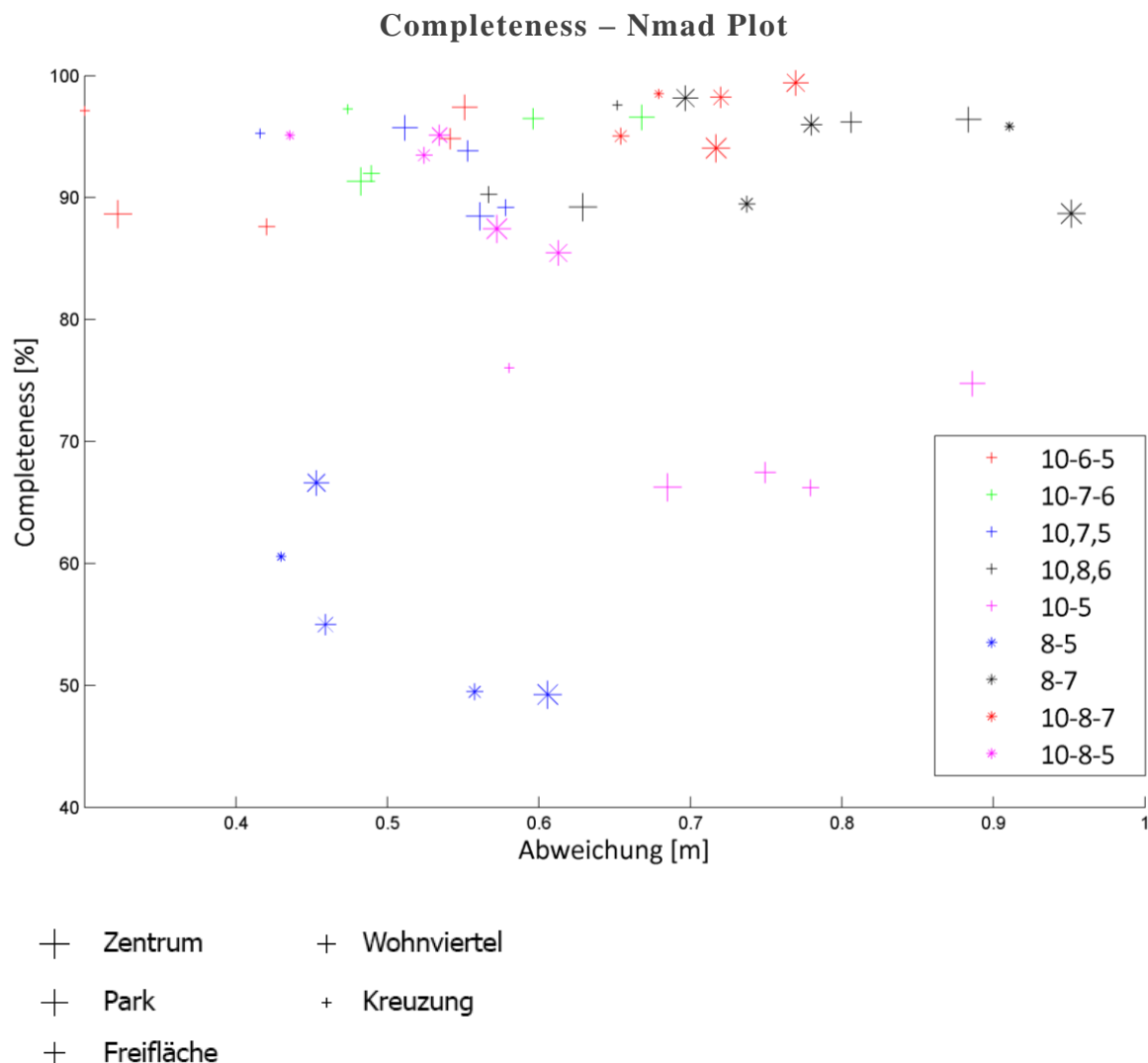


Abbildung 45: Plot der Vollständigkeit der Testgebiete sowie Nmad
Residuen der Nmad gegenüber der Referenz 5-6 und erreichte Completeness

Wie bereits zuvor erwähnt, besteht zwischen den Kombinationen 5-6 und 10-6-5 eine (nicht lineare) statistische Abhängigkeit. Aus diesem Grund bietet das Ergebnis des Triplets 10-6-5 die besten Abweichungen. Ignoriert man dieses statistisch abhängige Triplet, zeigen die Triplet - Kombinationen 10-7-6, 10-7-5 und 10-8-5 die besten Ergebnisse bezüglich ihrer Nmad. Auffällig ist, dass die Kombination 10-8-7, welche ein In-track-Paar enthält, auch in Bezug auf diese Referenz hinsichtlich

ihrer Abweichung eher schlecht abschneidet. Unter den drei Triplets mit den niedrigsten Abweichungen ist es schwer feststellbar, welches dieser Triplets am besten abschneidet. Betrachtet man die Triplets mit der Anforderung an eine möglichst geringe Abweichung und kann eine um wenige Prozente geringere Vollständigkeit in Kauf nehmen, schneidet das Triplet 10-7-5 am besten ab. Legt man jedoch Wert auf eine maximale Vollständigkeit und kann Abweichungen in der Genauigkeit bzw. einzelne Artefakte oder Rauschen hinnehmen, schneiden die übrigen Triplets mit 10-8-7 an der Spitze am besten ab.

Residuen zum Höhenmodell 5-6

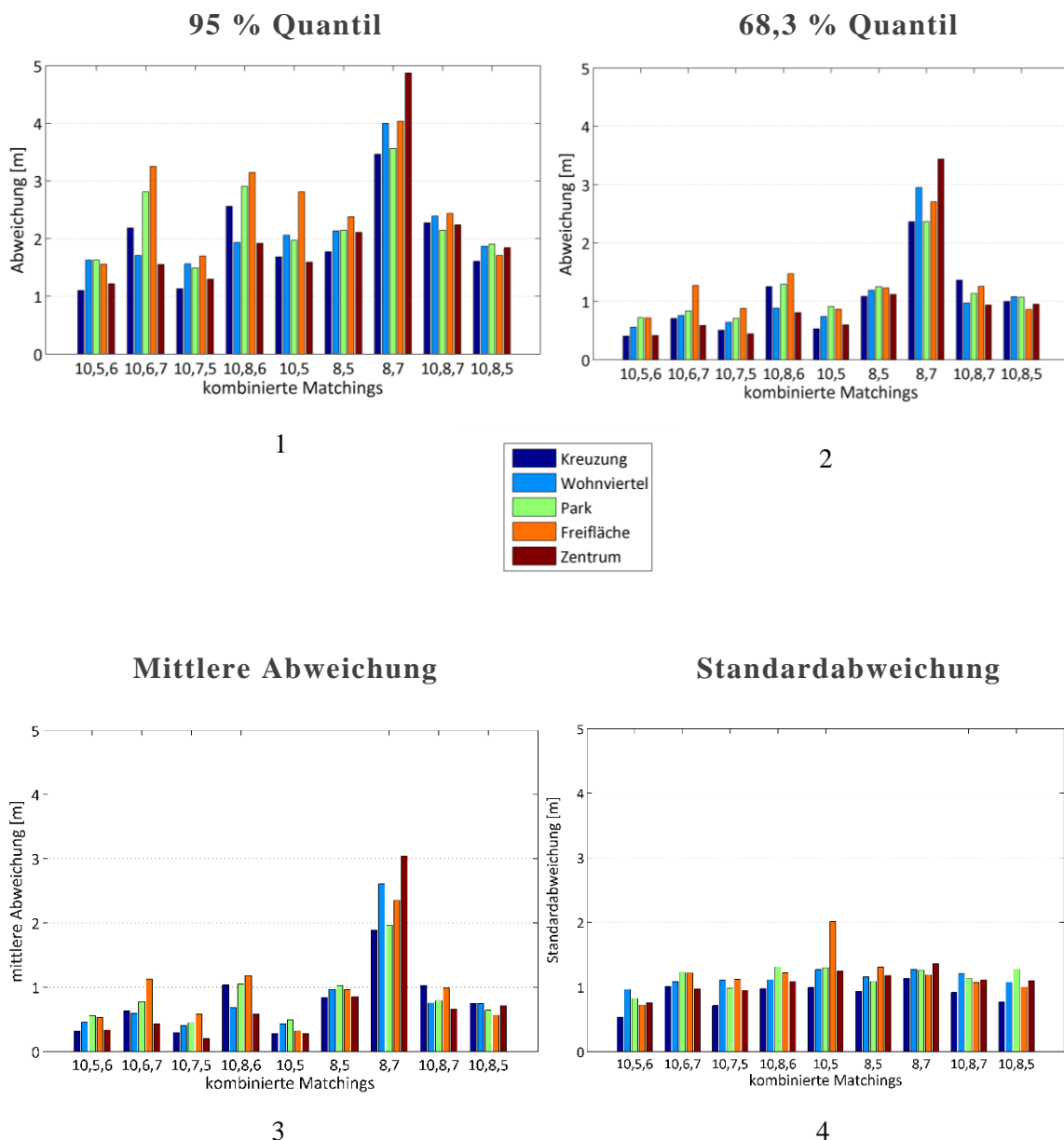


Abbildung 46: Plots der Quantile, Mean und Standardabweichungen zum Höhenmodell 5-6

1: Abweichungen des 95% Quantils

2: Abweichungen des 68,3% Quantils

3: Mittlere Abweichung

4: Standardabweichung

Bezieht man die Aufnahmekonstellation in die Ergebnisse ein, zeigt sich auch in den präsentierten Statistiken der große Einfluss der Aufnahmewinkel und besonders des Konvergenzwinkel.

Wie auch im Plot Completeness - Nmad festzustellen ist, zeigt sich in den Plots der Quantile 95 und 68,3 die Kombination 10-7-5 als diejenige mit den wenigsten starken Abweichungen, sowie den geringsten Abweichungen im 68,3 % Quantil. In der Kombination 10-5 zeigt sich im Plot der Standardabweichung, dass es wahrscheinlich ist, dass diese Ausreißer enthält. Bezüglich ihrer robusten Abweichungen zeigt sich ebenso ein sehr gutes Ergebnis.

Im Triplet 10-7-5 fließt diese Stereokombination zu einem gewissen Teil ein. Bezüglich einer Veränderung der Ergebnisse durch den zeitlichen Abstand ist keine erkennbare Beeinflussung im Hinblick auf Abweichungen zu erkennen. Die Aufnahmewinkelkonfiguration hat so viel Einfluss auf die Ergebnisse des Höhenmodells, dass Abweichungen auf einer ausschnittsweisen oder globalen Statistik nur bedingt festgestellt werden können. Ob trotz dieses Einflusses, Aufnahmedatenbedingte Höhenabweichungen festgestellt werden können, soll in der visuellen Analyse überprüft werden. Ebenso wurde untersucht, ob sich eine Abhängigkeit der Residuen von den Hangneigungen feststellen lässt. Dabei wurde ein leichter Anstieg der Abweichungen ab ca. 20 ° Hangneigung festgestellt. Dieser Anstieg wird in einem großen Teil der Daten bei etwa 40° Hangneigung deutlich steiler.

6.1.3 Visuelle Analyse

Methodisches Vorgehen

Vorerst wird in der visuellen Analyse auf die Auffälligkeiten der statistischen Analyse bezüglich der Vollständigkeit der erzeugten Höhenmodelle eingegangen werden. Dazu sollen bildhafte Beispiele präsentiert werden, welche die Besonderheiten möglicher Kombinationen hinsichtlich der Variation ihres Aufnahmedatums gut widerspiegeln. Es sollen einerseits einzelne Features behandelt werden, welche bezüglich der Variation der verwendeten Bilder unterschiedlichen Datums weitgehend invariant zu sein scheinen, andererseits sollen solche betrachtet werden, welche ein gutes Beispiel für dynamikabhängige Features bieten. Die verschiedenen Kompositionen werden hinsichtlich sichtbarer Qualitätsmerkmale bzw. Indikatoren wie Rauschen, fehlende Abbildung von Features, Artefakte oder Abbildung von Kanten, verglichen und analysiert. Auch der Vergleich mit den vorhandenen Referenzdaten soll visuell mit Hilfe von Differenzbildern interpretiert und bewertet werden. Für die visuelle Untersuchung der Qualität bietet es sich an, alle möglichen Kombinationen an Höhenmodellen, resultierend aus Stereodaten, zu vergleichen. Die Veränderung bei der Verwendung eines Triplets bzw. vier oder fünf Aufnahmen soll im Anschluss überprüft werden.

Betrachtet man die einzelnen Höhenmodelle, ohne dabei auf die Menge ihrer Voidbereiche einzugehen, ist es sinnvoll, alle beobachteten Features getrennt von allen verfügbaren Analysemaßnahmen zu untersuchen. Dazu sollen vorerst Features untersucht werden, welche sich in Bodennähe befinden. Auch die Lidar - Referenz soll miteinbezogen werden. Anschließend sollen die Ergebnisse reliefierter Bereiche und anthropogener Features untersucht werden. Zuletzt sollen Mehrfachstereokombinationen bezüglich der zuvor untersuchten Features untersucht werden.

Vollständigkeit

Stellt man an die einzelnen Testgebiete die Frage, welche Bereiche in across - track Stereoaufnahmen eine geringere Vollständigkeit besitzen, bietet es sich an, along - track und across - track Stereoaufnahmen direkt zu vergleichen. Es kann jedoch nur eine Aussage getroffen werden, ob es sich bei einem Voidbereich um eine Verdeckung oder eine fehlende Korrespondenz auf Grund von Veränderungen über einen Zeitraum handelt, wenn die einzelnen in das Modell eingeflossenen Bilder zusätzlich zum resultierenden Modell selbst betrachtet werden.

Ein gutes Beispiel bieten die Testszenen 10-7 und 7-8. Die Bilder für Testszene 7-8 wurden fast zeitgleich aufgenommen, während 10-7 einen Zeitabstand von 22 Tagen aufweist. Der Vergleich bietet sich an, da die Szene 7 in beiden Kombinationen vorkommt. Temporal hervorgerufene Unterschiede lassen sich deshalb auch durch einen direkten Vergleich der Szenen 7 und 10 gut feststellen.

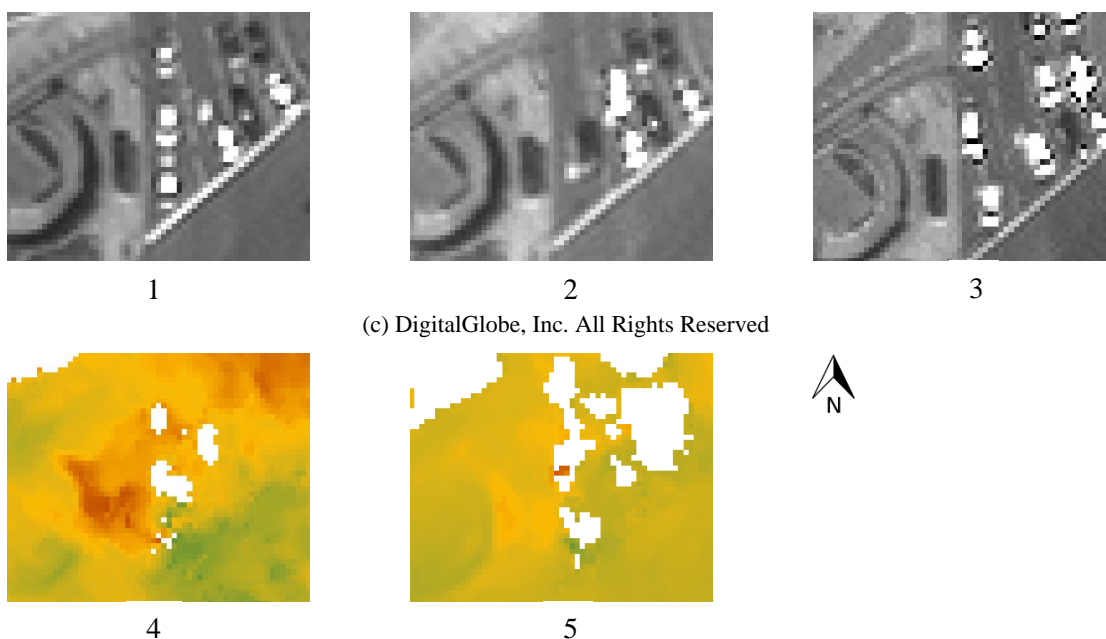


Abbildung 47: Auswirkungen von Fahrzeugen auf das DSM

1: Bild 7

2: Bild 8

3: Bild 10

4: Höhenmodell 8-7

5: Höhenmodell 7-10

Veränderungen und Bewegungen von Objekten

Bei der Analyse dieser beiden Datensätze konnten Features in den Voidbereichen festgestellt werden, welche in den Orthobildern deutliche Veränderungen aufweisen. Während im Höhenmodell 8-7 deutlich wird, dass Fahrzeuge auf den Straßen entweder vorhanden oder nicht erkennbar sind und sich als Rauschen oder Abweichung äußern (Abbildung 47, oranger Bereich im Bildzentrum, Bild 8-7), kann man auf den Straßenbereichen im Höhenmodell 7-10 deutliche Voidbereiche feststellen. Diese Voidbereiche treten an Bereichen auf, in welchen sich Fahrzeuge im Bild 10 oder 7 auf den Straßen befinden. Während Voidbereiche wie diese auf den breiten Straßen der suburbanen Testgebiete weniger problematisch erscheinen, da sie durch eine Interpolation ausgeglichen werden können und somit nicht

mehr auffallen, stellt sich die Lage in den Bereichen des Stadtzentrums anders dar. Fahrzeuggruppen an Ampeln oder Staus bilden im Zentrum große Voidbereiche, welche direkt an Gebäude angrenzen. Zieht man interpolierte Bereiche solcher Gebiete hinzu, stellt sich heraus, dass für die Interpolation auch Höhenwerte verwendet werden, welche auf Gebäuden liegen. Es entsteht somit ein interpolierter Bereich zwischen Gebäuden, was dazu führt, dass sich Gebäude nicht mehr eindeutig trennen lassen. Mit verschiedenen Interpolationstechniken lassen sich solche Bereiche zwar in vielen Fällen mit weitgehend korrekten Höhenwerten füllen - erstreckt sich ein solcher Bereich jedoch über einen größeren Bereich, beispielsweise einer innenstädtischen Straße, können als statistische Grundlage für Interpolationsmethoden nicht mehr genügend korrekte Werte an den Rändern der Voidbereiche gefunden werden.

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

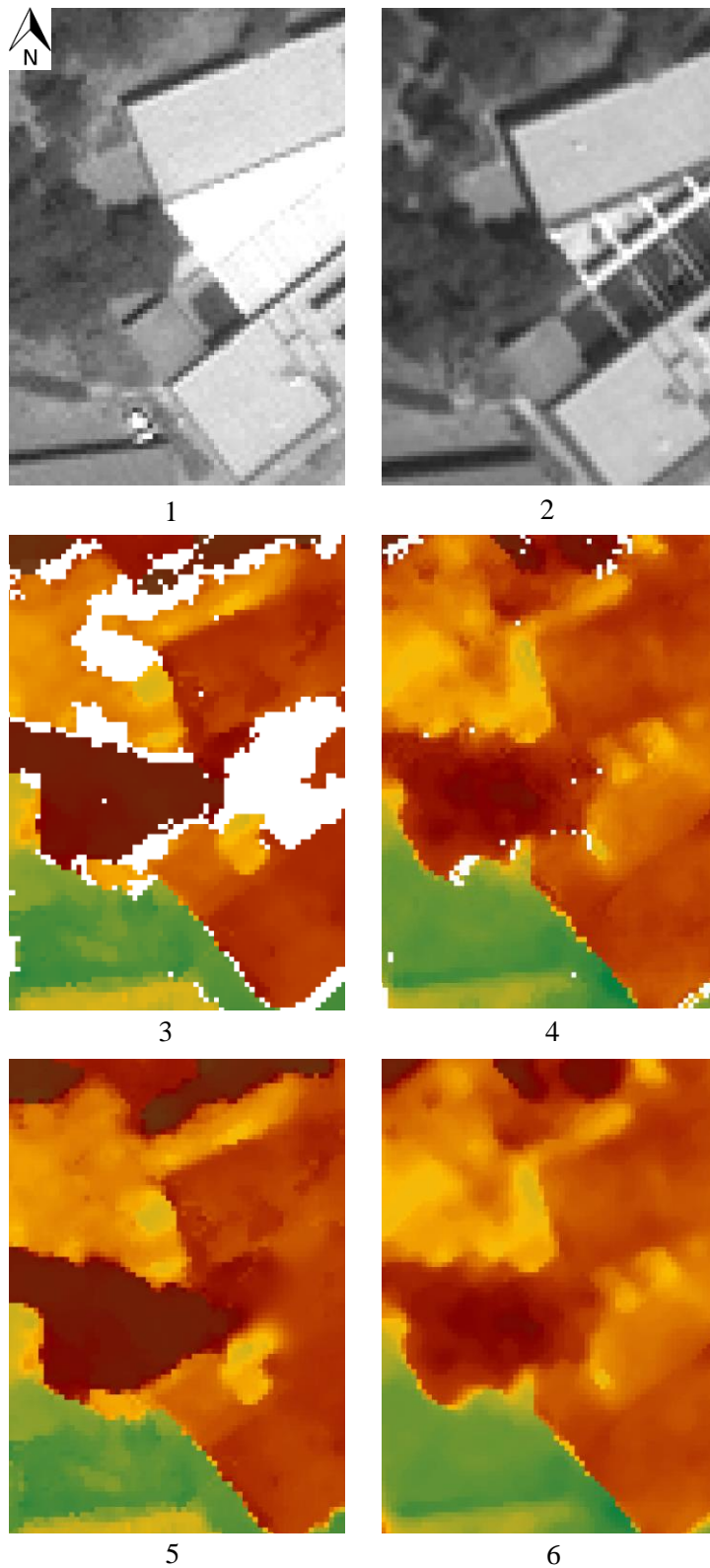


Abbildung 48: Auswirkung veränderter Gebäudeteile auf das DSM

1: Bild 10

2: Bild 7

3: Höhenmodell 10-7

4: Höhenmodell 8-7

5: Mit IDW - Interpolation interpoliertes Höhenmodell 10-7

6: Mit IDW-Interpolation interpoliertes Höhenmodell 8-7

Ähnlich wie die Fahrzeuge in Abbildung 47 verhält es sich beim Sonnendach in Abbildung 48 des Gebäudes im Testgebiet „Kreuzung“, welches in Aufnahme 10 geschlossen und in Aufnahme 7 bzw. 8 offen ist. Der südliche Gebäudeflügel lässt sich durch eine anschließende Interpolation nicht mehr eindeutig vom nördlichen trennen.

Vegetationsbereiche

Als weiteres Feature sind einzelne Baumgruppen oder Bäume feststellbar, welche in der Kombination 5-6 vorhanden sind. Diese resultieren jedoch ohne eindeutig sichtbare Veränderung in den Bildern 10 und 5 in der Kombination 10-5 als Voidbereich. Da sich die Aufnahmen 5 und 6 am Anfang der Herbstzeit und die Aufnahme 10 im Spätsommer befinden, könnte die Ursache dieser fehlenden Ähnlichkeit an Veränderungen in der Dichte des Blattwerks oder an den Verfärbungen der Blätter liegen. Betrachtet man ein Höhenmodell aus Aufnahmen, welche den höchsten Zeitabstand haben, wird eine Ausweitung dieses Effekts deutlich. An der Baumgruppe in Abbildung 49 in den Kombinationen 6-5, 10-5 und 8-5 erkennt man, dass trotz visuell nicht feststellbarer Unterschiede des Waldstücks in allen Eingangsbildern eine Korrelation zwischen erreichter Vollständigkeit des Höhenmodells und zeitlichem Abstand der verwendeten Aufnahmen bezüglich der Vegetation besteht. Zwar lässt sich die fehlende Vollständigkeit in den Waldstücken teilweise durch Verdeckungen erklären, da jedoch auch die Kronenbereiche der Bäume betroffen sind, lässt sich dies für diese Bereiche ausschließen. In Abbildung 49, in der ein Waldstück in einem Park abgebildet ist, wird eine Korrelation der Aufnahmeabstände und der Vollständigkeit deutlicher.

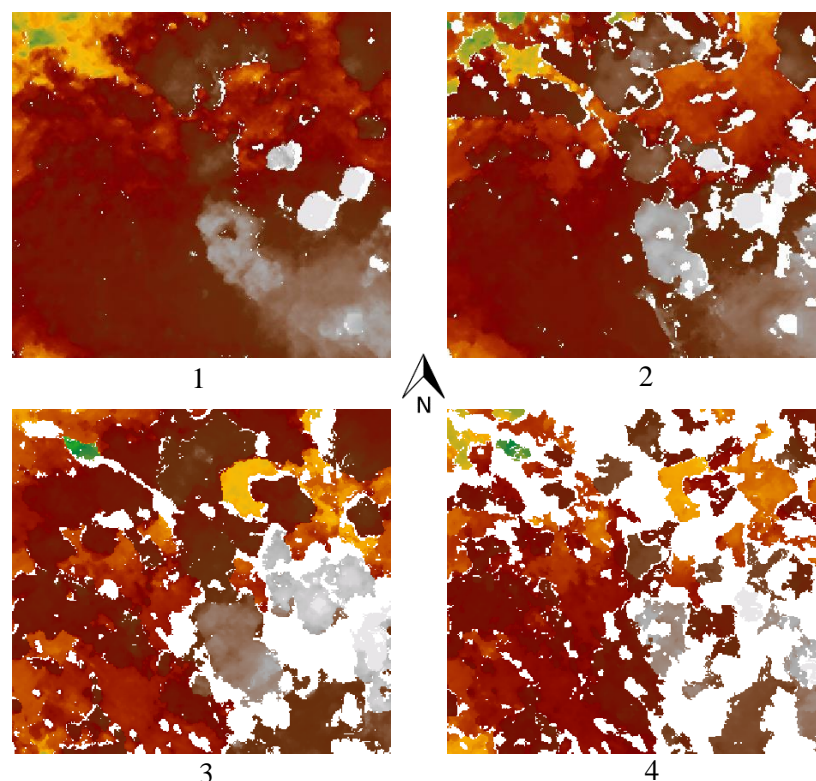


Abbildung 49: Auswirkungen zeitlicher Abstände auf die Vegetation im DSM

- 1: Höhenmodell 7-8 (kein Abstand)
- 2: Höhenmodell 7-10 (20 Tage Abstand)
- 3: Höhenmodell 6-10 (2,2 Monate Abstand)
- 4: Höhenmodell 6-7 (3 Monate Abstand)



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Abbildung 50: Pangeschärftes nadirnahes Orthophoto
Falschfarbendarstellung (Nir, Rot, Grün)

Während in der Kombination 7-10 (0,8 Monate Abstand) nur einzelne Bäume sowie ein Teil der Oberfläche nicht rekonstruiert werden konnten, treten in der Kombination 6-10 (2,2 Monate Abstand) bereits deutliche Voidbereiche auf den ebenen Flächen im Südosten auf. Ebenso konnte der Weg im nordwestlichen Bereich nicht rekonstruiert werden. In Kombination 6-7 konnten nur die wenigsten Bäume oder Sträucher sowie nur ein sehr kleiner Teil der Oberfläche des östlichen Bereichs rekonstruiert werden. Auffällig dabei ist, dass der westliche Teil der Oberfläche zu einem sehr großen Anteil rekonstruiert werden konnte. Zieht man das pangeschärfte Orthobild in Falschfarbendarstellung³⁹ heran, wird deutlich, dass die Oberfläche im östlichen Bereich des Parks deutlich mehr Grasbewuchs aufweist als die des westlichen. Dadurch bestärkt sich die Annahme, dass durch die sehr trockenen Monate Juli/August mit unter 20 mm/m² Niederschlag besonders die Rasenflächen austrocknen und in diesem Bereich eine höhere Dynamik zwischen den Aufnahmen besteht.

Oberflächen

Ein ähnlicher Effekt lässt sich im Westen der Stadt beobachten, wo sich ausgedehnte Freiflächen befinden. In folgenden Abbildungen (Abbildung 51, Abbildung 52 und Abbildung 54) sind Ausschnitte dargestellt, die sich außerhalb des Bereiches befinden, in dem sich alle 5 Bilder überlappen. In diesen Fällen überlappen sich immer nur je drei Bilder mit jeweils unterschiedlichem Aufnahmedatum. Es ist diesen Bereichen damit maximal ein Vergleich dieser Kombinationen möglich. In Abbildung 51 ist eine Pferderennbahn abgebildet. Auf den einzelnen Orthobildern ist auf der Oberfläche der Rennbahn mit bloßem Auge keine Veränderung zwischen den Aufnahmen erkennbar. Die Rennbahn bietet ein gutes Beispiel für derartige Features, welche eine fast planare, natürliche Oberfläche besitzen (Gras und steinige Oberfläche), jedoch nicht natürlichen Ursprungs sind und von Menschenhand stetig verändert werden. Betrachtet man die resultierenden Höhenmodelle, treten besonders große Voidbereiche, sowie Artefakte innerhalb der Rennbahn auf. Der äußerste Ring der Rennbahn, der in Abbildung 51 dunkler erscheint, ist durch Grasbepflanzung begrünt. Tabelle 9 zeigt die erreichten Vollständigkeits der Kombinationen.

³⁹ Der grüne Farbkanal wurde durch den NIR-Kanal in der RGB Farbdarstellung getauscht. Durch die Falschfarbendarstellung wird aufgrund des Einbeziehens des NIR Kanals, der durch die hohe Reflektivität von Chlorophyll im infraroten Spektrum in Bereichen der Vegetation eine hohe Intensität besitzt, die Vitalität, die Häufung oder die Art von Vegetation erkenntlicher als in der RGB Darstellung.

Tabelle 9: Vollständigkeiten der Kombinationen des Ausschnitts der Pferderennbahn

Kombination	8-10 (0,8 Monate Abstand)	5-10 (2,2 Monate Abstand)	8-5 (3 Monate Abstand)
Vollständigkeit	86,1 %	79 %	73,4 %

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

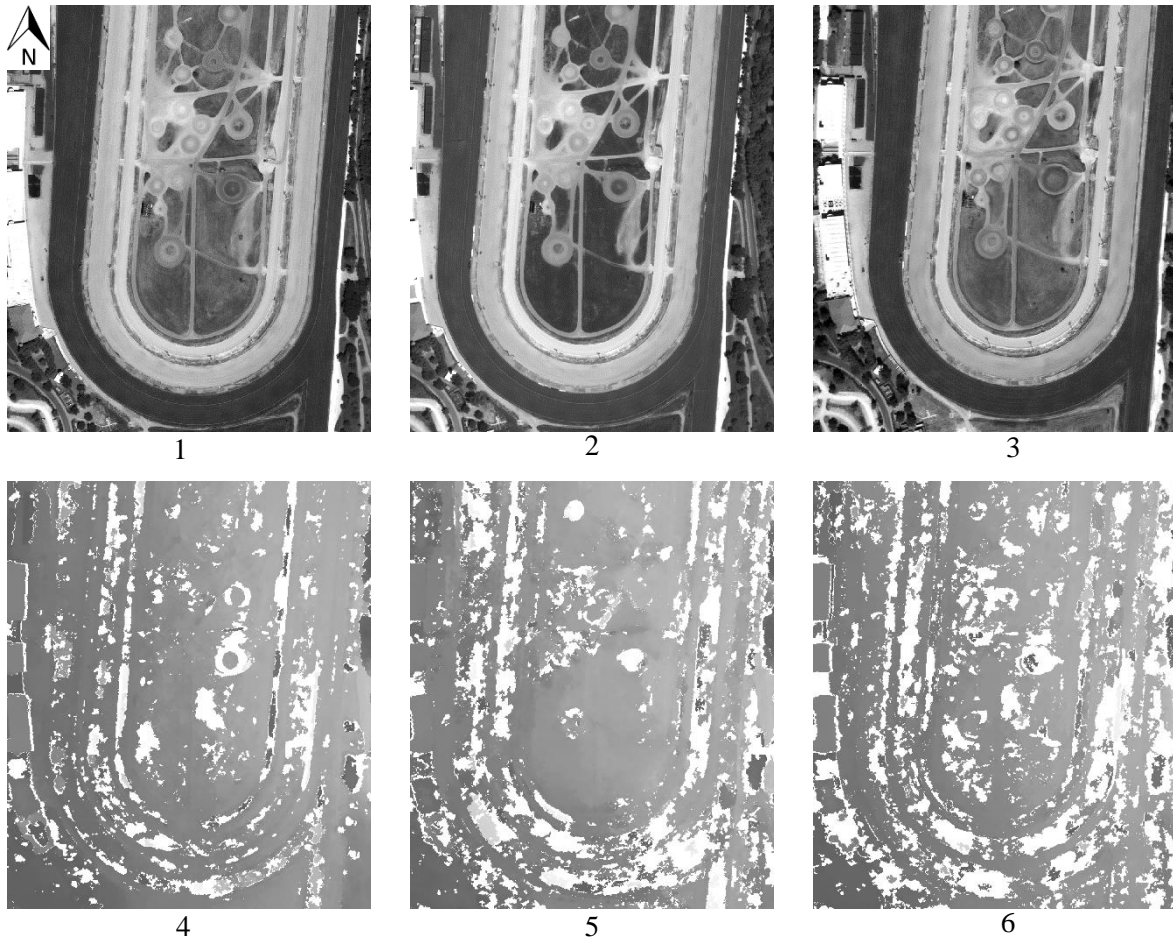


Abbildung 51: Auswirkungen zeitlicher Abstände auf anthropogene Features

1: Bild 8

2: Bild 10

3: Bild 5

4: Höhenmodell 8-10 (0,8 Monate Abstand)

5: Höhenmodell 5-10 (2,2 Monate Abstand)

6: Höhenmodell 8-5 (3 Monate Abstand)

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

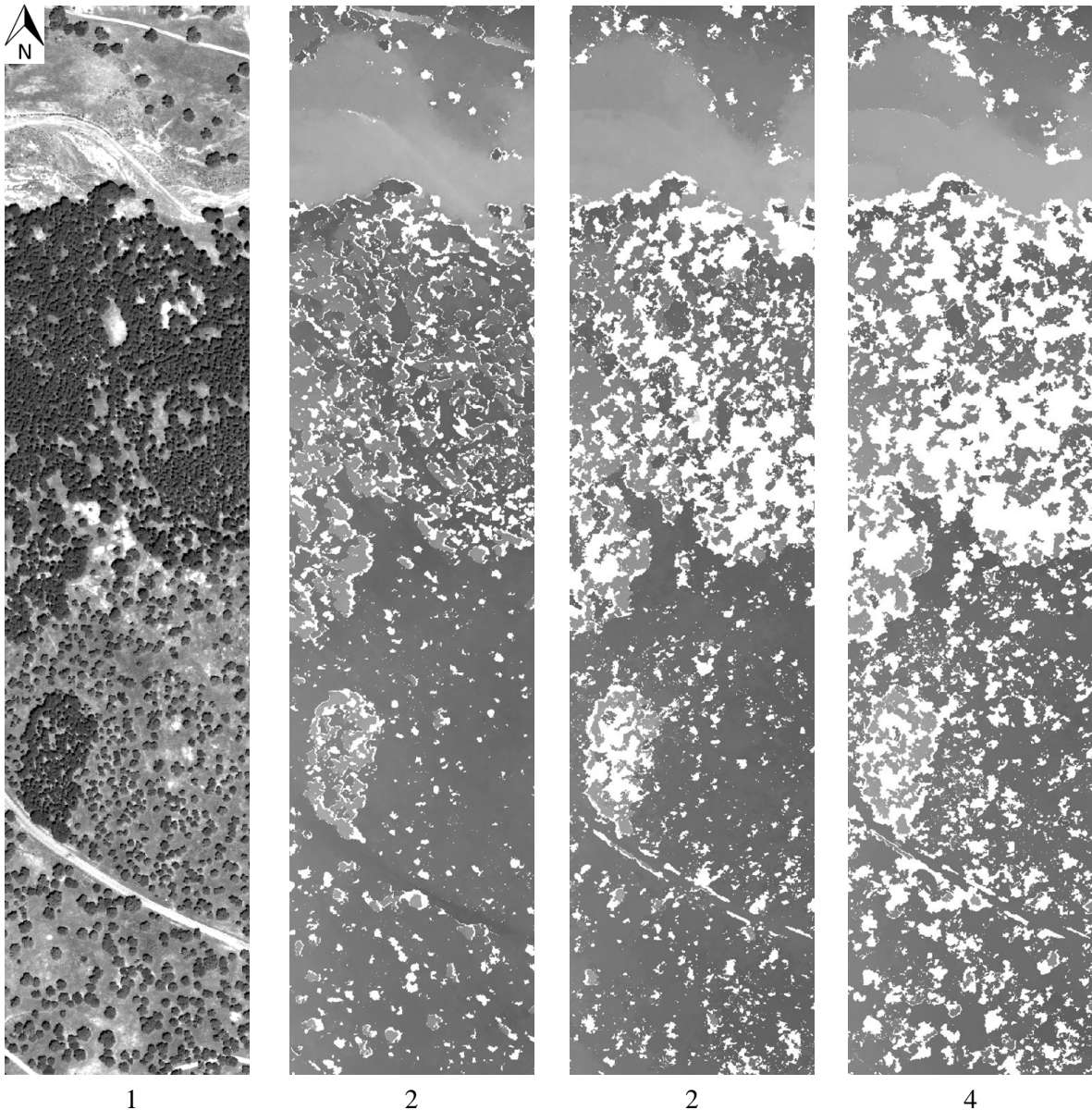


Abbildung 52: Auswirkung zeitlicher Abstände auf natürliche Bereiche

1: Nadirnahes Orthobild

2: Höhenmodell 8-10 (0,8 Monate Abstand)

3: Höhenmodell 5-10 (2,2 Monate Abstand)

4: Höhenmodell 8-5 (3 Monate Abstand)

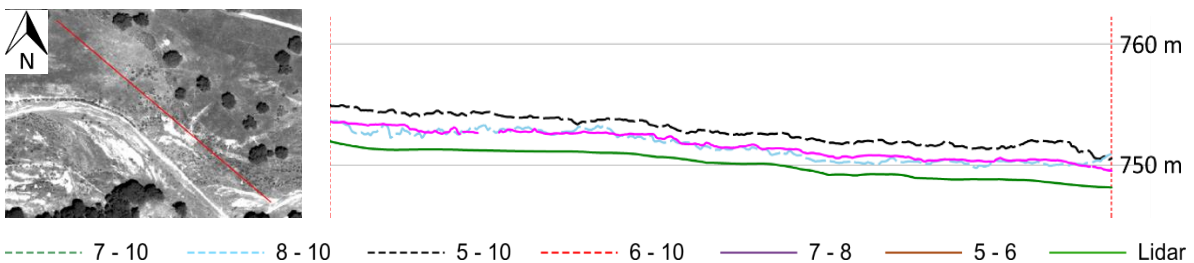


Abbildung 53: Profillinie und Profilschnitt durch einen brachliegenden Bereich

Links: Profillinie (rot) mit Orthobild als Hintergrund

Rechts: Profilschnitt (3-fach überhöht)

In Abbildung 52 ist ein Ausschnitt einer Freifläche außerhalb von Madrid abgebildet. Sträucher und Bäume verschiedener Größen und unterschiedlich dichtem Bewuchs decken etwa die Hälfte der Fläche ab. Der Untergrund zeichnet sich durch kargen Boden mit vereinzeltem Bewuchs aus. Im südlichen Bereich befindet sich als einziges anthropogenes Objekt eine Straße. Auffällig ist zunächst der Bereich des ausgetrockneten Flussbetts im Norden des Ausschnitts. Selbst in der Kombination 5-8 mit drei Monaten Abstand scheint die Oberfläche, welche nicht durch Bäume oder Sträucher bedeckt ist, annähernd komplett rekonstruiert worden zu sein. Die Vollständigkeit bezüglich der Vegetation weist nach 0,8 Monaten nur minimale Voidbereiche auf, wobei nach 2,2 Monaten Abstand, wie Tabelle 10 zeigt, etwa 10 % weniger Vegetation rekonstruiert werden konnte. Der Bereich des Bodens konnte selbst nach drei Monaten im gesamten Bereich annähernd komplett rekonstruiert werden. Diejenigen Bereiche der Vegetation, die selbst nach 2,2 bzw. 3 Monaten rekonstruiert werden konnten, zeigen eine sehr hohe Dichte in ihrem Bewuchs. Auch für die Bäume im Norden des kleinen Waldstücks ergibt sich eine höhere Rekonstruktionsquote der Vegetation. Sie zeichnen sich durch ihren höheren Kronendurchmesser bzw. ihre Größe aus. Im Profilschnitt in Abbildung 53 erkennt man, dass sich leichte Unterschiede in der rekonstruierten Höhe ergeben. Es treten jedoch keine Artefakte oder starke Differenzen der Kombinationen untereinander auf. Leichte Unterschiede bezüglich des Rauschens bzw. Detailgrades sind vorhanden, fallen jedoch nicht sehr groß aus.

Tabelle 10: Vollständigkeiten des Ausschnitts „Freifläche“

Kombination	8-10 (0,8 Monate Abstand)	5-10 (2,2 Monate Abstand)	8-5 (3 Monate Abstand)
Vollständigkeit	88,6 %	78,2 %	66,8 %

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

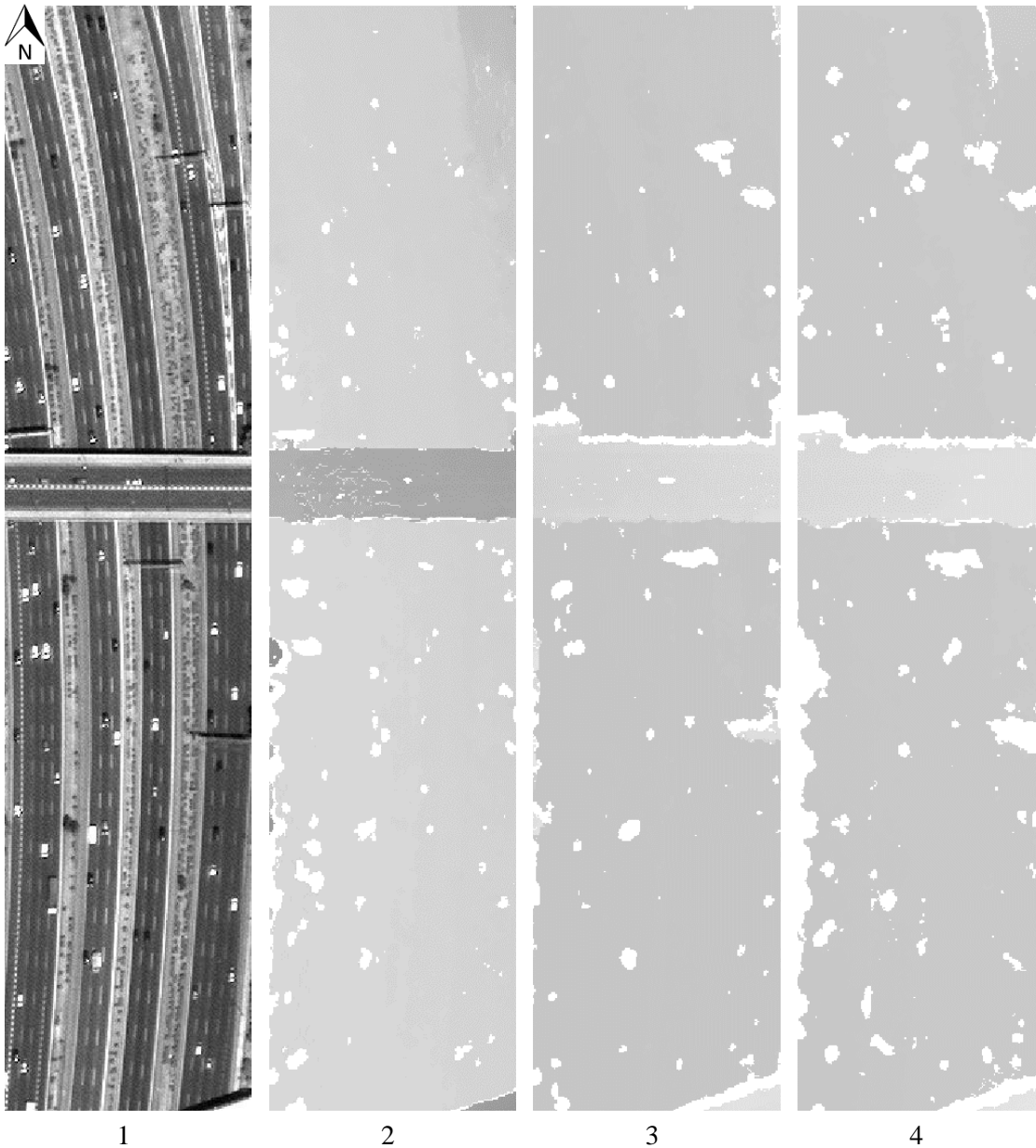


Abbildung 54: Auswirkungen zeitlicher Abstände auf asphaltierte Bereiche

1: Nadirnahes Ortophoto

2: Höhenmodell 7-10 (20 Tage Abstand)

3: Höhenmodell 6-10 (2,2 Monate Abstand)

4: Höhenmodell 6-7 (3 Monate Abstand)

Farbunterschiede entstehen auf Grund unterschiedlicher Streckungsstatistiken.

Tabelle 11: Vollständigkeiten des Ausschnitts Straße

Kombination	7-10 (0,8 Monate Abstand)	6-10 (2,2 Monate Abstand)	7-5 (3 Monate Abstand)
Vollständigkeit	95,9 %	95,6 %	92,4 %

Qualität

Unabhängig von einzelnen Features fällt bei der Untersuchung der einzelnen Matches bzw. Höhenkarten besonders die Abhängigkeit der Aufnahmewinkel bzw. besonders des Konvergenzwinkels auf. Diese Abhängigkeit äußert sich vor allem durch Rauschen in Kombinationen mit niedrigem Konvergenzwinkel, namentlich der Kombination 7-8. Gegenteilig verhalten sich Stereopaare mit hohem Konvergenzwinkel, beispielsweise 5-7, 6-7, 5-8 und 5-7 und es dominiert dabei eine detailarme sowie rauscharme Ausprägung. Ein vielseitiges Beispiel stellt ein Gebäude mit einem Innenhof auf der gegenüberliegenden Straßenseite im dicht besiedelten Innenstadtbereich von Madrid dar. In der Analyse der einzelnen Aufnahmen wurden keine visuellen Veränderungen festgestellt, mit Ausnahme der Parkplatzbereiche auf der Straße.



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved



(c) Google, 2014

Abbildung 55: Vorstellung eines Detailausschnitts
 Links: Orthobild mit Profillinie (rot)
 Rechts: Ausschnitt von Google Street View

Der Testausschnitt aus dem Testgebiet „Wohnviertel“ beinhaltet ein Wohngebiet, in dem eine Freifläche eingebettet ist. Wie in Abbildung 55 zu sehen ist, liegt diese Freifläche einige Meter unterhalb des Straßenniveaus. Eine Profillinie wurde durch ein Gebäude gegenüber dieser Freifläche gezogen. Es sticht besonders hervor, da das Gebäude auf dem Dach ein quaderförmiges Objekt besitzt, bei welchem es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um einen Aufzugschacht handelt.

Betrachtet man die dreidimensionale Ansicht und das Höhenprofil des Ausschnitts, fällt auf, dass die Kombinationen 7-10 und 8-10 deutlich weniger Rauschen aufweisen als die Kombinationen 5-10 und 6-10. Diese Auffälligkeit ist vor allem auf den Hausdächern zu erkennen. Die Abweichungen zum Lidar-Geländemodell sind in den Kombinationen 7-10 und 8-10 ebenfalls minimal geringer als in den Kombinationen 5-10 und 6-10. Ob die Ursache dieser beiden Phänomene jedoch an den Unterschieden des Aufnahmedatums liegt, oder sich auf geringe Unterschiede der Aufnahmegeometrie zurückführen lässt, kann nicht eindeutig beantwortet werden.

Da keine Referenzdaten bezüglich der Gebäude vorhanden sind, kann nicht eindeutig festgestellt werden, welcher der Höhenwerte für den Dachbereich derjenige ist, der am besten zu den Gebäudehöhen in der Realität passt. Untersucht man jedoch die Differenzen zum Lidar-Geländemodell in bodennahen Gebieten, kann man erkennen, dass die Höhenreihenfolge der Kombinationen untereinander auf den Dächern ähnlich wie in bodennahen Gebieten ist. Sie ist auf Dächern etwas weiter aufgefächert, Ähnlichkeiten lassen sich dennoch feststellen.

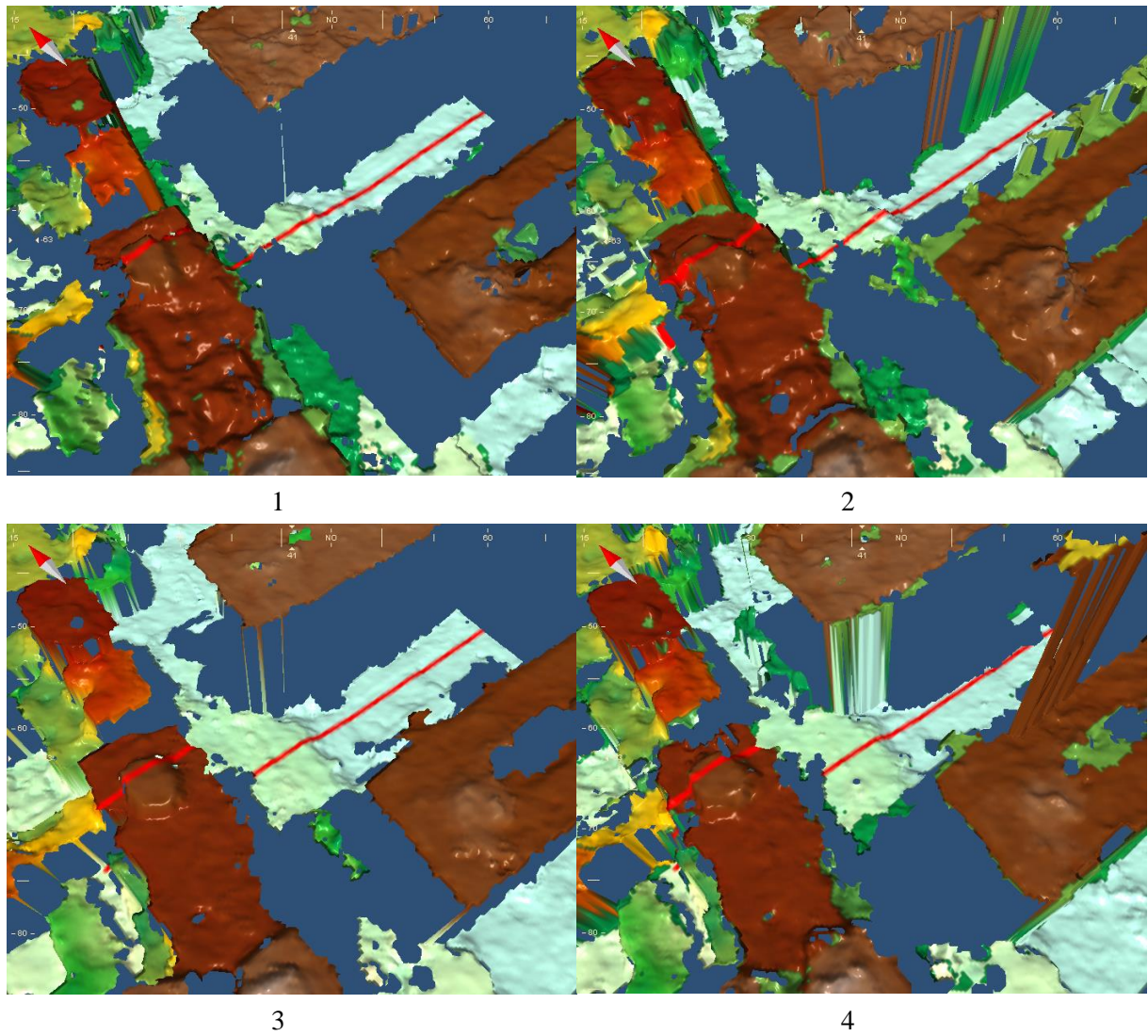


Abbildung 56: Darstellung der Höhenmodelle des Detailausschnitts

1: Höhenmodell 5-10

2: Höhenmodell 6-10

3: Höhenmodell 7-10

4: Höhenmodell 8-10

jeweils gestreckt mit 2-facher Standardabweichung, mehrfarbige Einfärbung

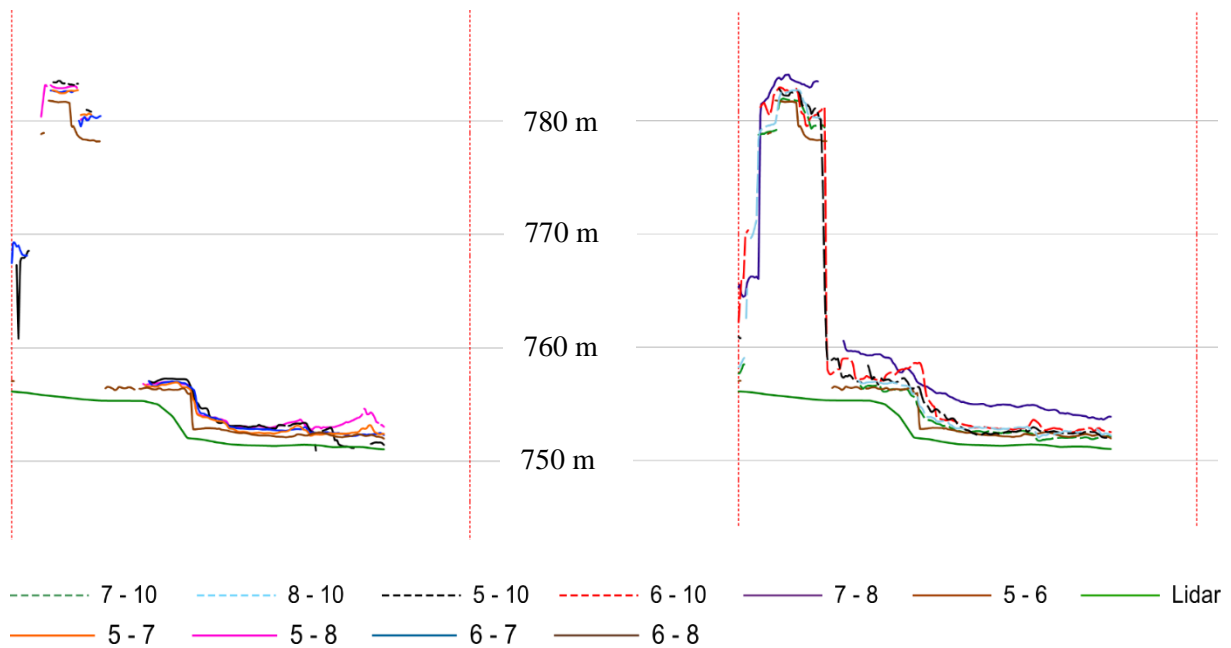


Abbildung 57: Höhenprofile des Detailausschnitts
(3-fach überhöht)

Plausibilität und optischer Eindruck

Betrachtet man die across-track Kombinationen 5-7, 5-8, 6-7 und 6-8 mit jeweils drei Monaten Zeitabstand und hohen Konvergenzwinkeln von 29° - 32° , lässt sich neben der geringen Vollständigkeit auch die ähnliche und genaue Abbildung dieser Kombinationen erkennen. Nimmt man das along-track Paar 5-6 hinzu, welches einen geringeren Konvergenzwinkel von $23,7^\circ$ und dadurch auch eine deutlich höhere Vollständigkeit besitzt, kann man feststellen, dass weder auf der Ebene, noch auf den Dächern große Unterschiede in der Abbildung vorkommen. Der Zeitunterschied von drei Monaten zeigt bezüglich der Qualität der Abbildung deshalb für diese Bereiche keine deutlich sichtbaren Auswirkungen auf das Ergebnis. Das along-track Stereopaar 5-6 weist mit den across-track Paaren 5-7, 5-8, 6-7 und 6-8 in beiden Profilansichten das plausibelste Ergebnis auf und überzeugt durch sehr geringes Rauschen und wenige Artefakte. Die durch den Konvergenzwinkel etwas rauschbehafteteren Kombinationen 7-10 und 8-10 erzielen ebenfalls ein gutes Ergebnis. Dieses Beispiel legt gut das Potential dar, das in der Methode steckt, ein solches Stereopaar durch ein drittes Bild zu ergänzen. Es bieten sich dazu Kombinationen aus den genannten Paaren an. Das Stereopaar 5-6 setzt sich jedoch angesichts der Vollständigkeit und des niedrigen Rauschens, sowie einer guten Abweichung von den übrigen Referenzdaten ab. Aus diesem Grund wird es in der statistischen Analyse als Referenz verwendet.

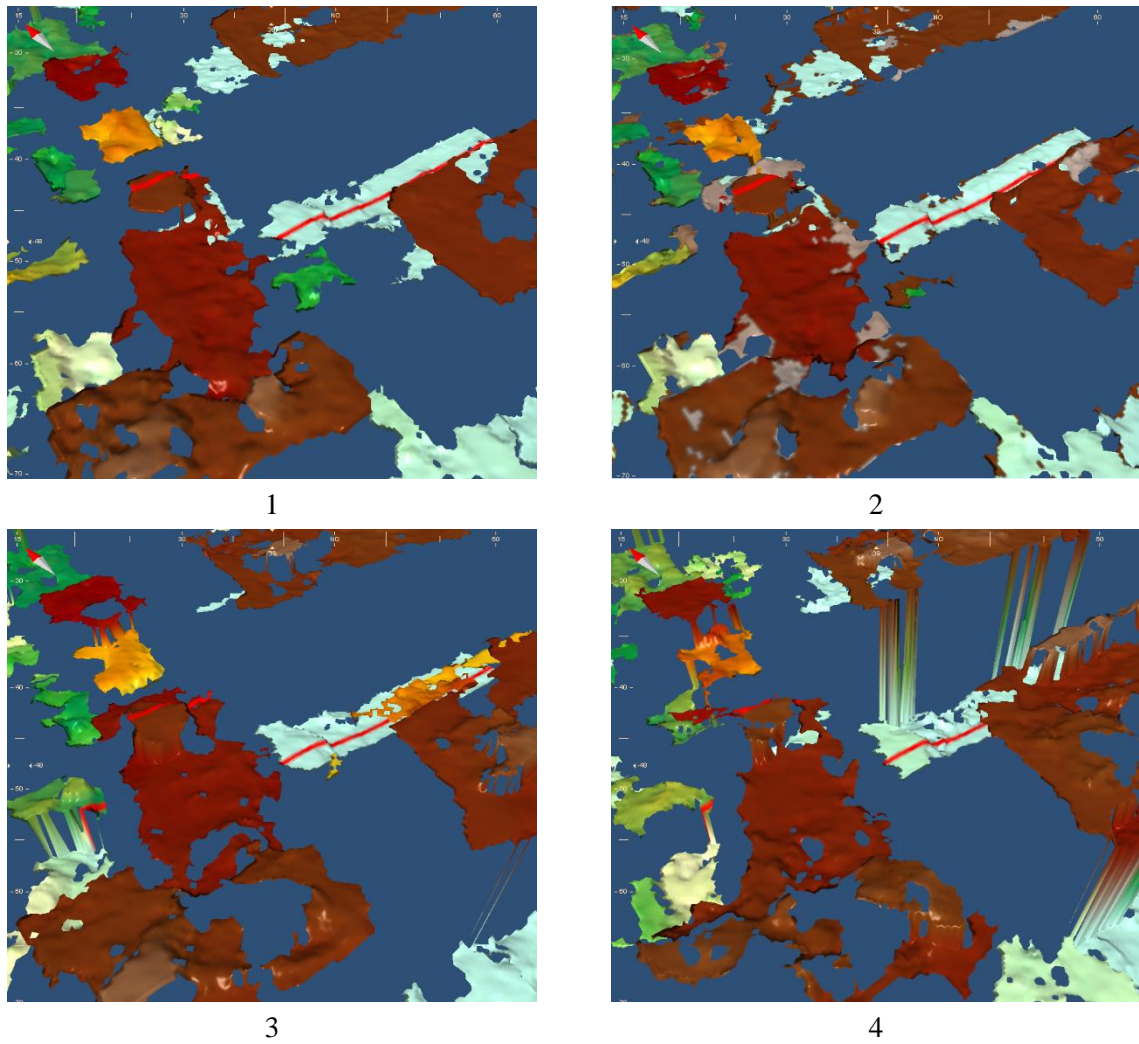


Abbildung 58: Darstellung einzelner Höhenmodelle des Detailausschnitts

1: Höhenmodell 5-7

2: Höhenmodell 5-8

3: Höhenmodell 6-7

4: Höhenmodell 6-8

jeweils gestreckt auf 2-fache Standardabweichung, mehrfarbige Einfärbung

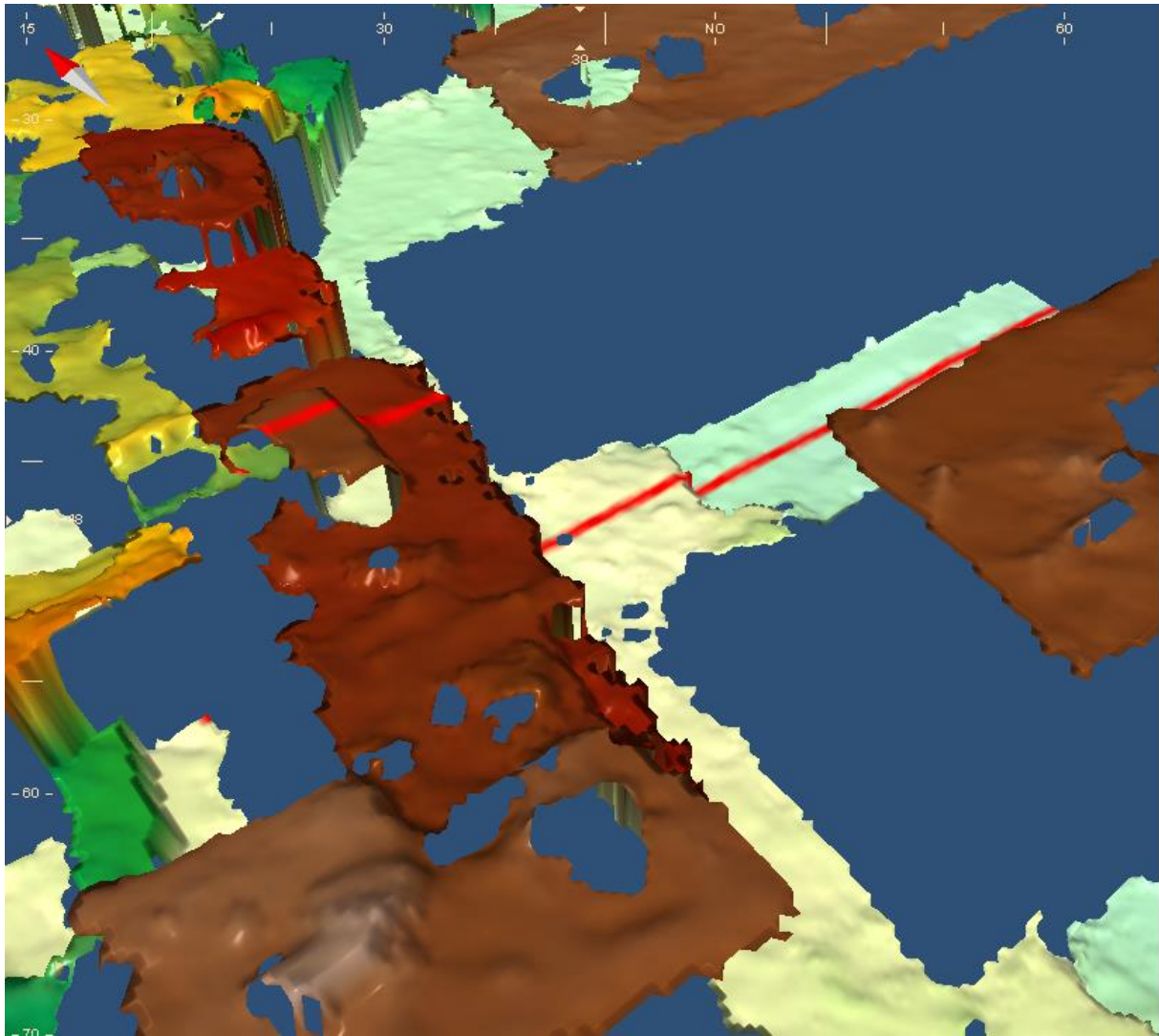


Abbildung 59: Höhenmodell 5-6, Detailausschnitt
gestreckt auf 2-fache Standardabweichung, mehrfarbige Einfärbung

Betrachtet man beispielsweise Triplet-Kombinationen aus den Paaren 5-6 bzw. 5-7 und einer zusätzlichen Szene im Nadir, zeigen sich neben der höheren Vollständigkeit auch Artefakte (Abbildung 58), welche sich zum größten Teil auf Straßen befinden. Diese Artefakte treten in den Stereopaaren auf, welche aus 5/6/7/8 und 10 entstanden sind. Da an den Orten der Artefakte nur Höheninformationen von diesen Paaren verfügbar sind, treten die Artefakte im resultierenden Höhenmodell auf.

Betrachtung von Triplet-Kombinationen

Vergleicht man die Triplets 5-7-10 und 5-6-10, lassen sich bezüglich der Qualität nur vorsichtige Aussagen treffen. Folgende Punkte fallen bei der Betrachtung der zwei Triplets auf:

- Die reine cross-track Kombination 5-7-10 weist minimal weniger Rauschen als die Kombinationen 5-6-10 auf. Ursache hierfür sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die höheren Konvergenzwinkel der enthaltenen Stereopaare.
- Die Abbildung von Kanten, insbesondere von Innenhöfen und Features auf Dächern äussert sich im Triplet 5-6-10 deutlicher. Dennoch machen Dachbebauung und Dachform im Triplet 5-7-10 einen plausibleren Eindruck.
- Es treten minimal mehr Artefakte auf den Straßen im Triplet 5-7-10 als im Triplet 5-6-10 auf.

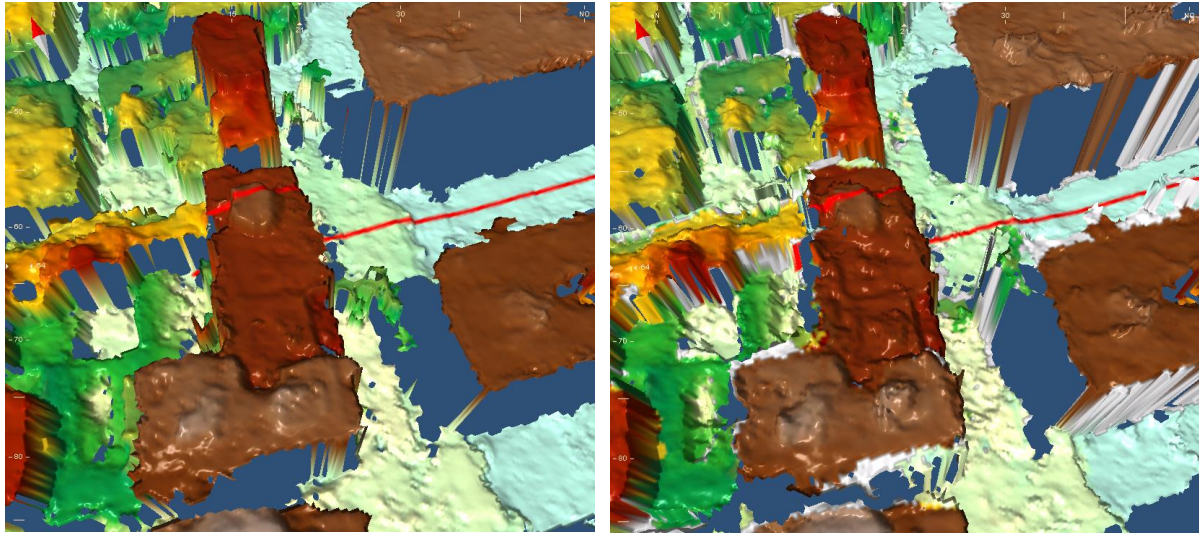


Abbildung 60: Weitere Höhenmodelle für den Vergleich des Detailausschnitts
 Links: Höhenmodell 10-5-7
 Rechts: Höhenmodell 10-5-6
 mehrfarbige Einfärbung

Bei weiteren Analysen kann man feststellen, dass Bereiche, welche mit Vegetation bedeckt sind, große Schwankungen bei einem Profilschnitt zeigen. Die Abbildung der Vegetation bei in-track und across-track Höhenmodellen werden im folgenden Ausschnitt, welcher ein Waldstück in einem Park darstellt, genauer betrachtet

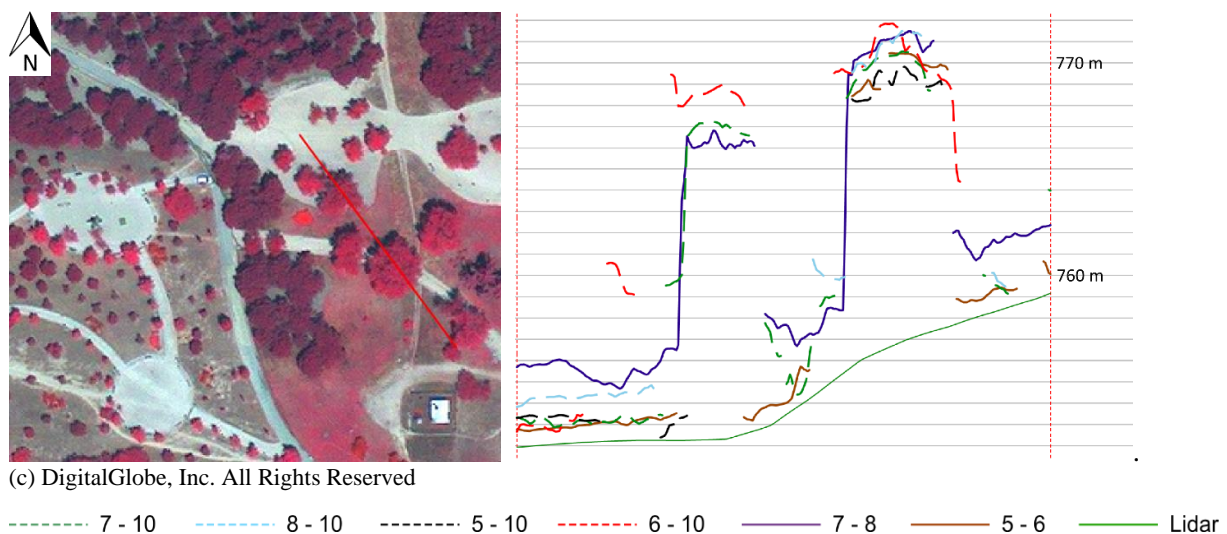


Abbildung 61: Profil und Profilschnitt mehrerer Bäume
 Links: Pangeschärftes Orthobild in Falschfarbenansicht
 Rechts: Entsprechendes Höhenprofil (3-fach überhöht)
 Rot: Profillinie

Wie bei der Analyse zur Vollständigkeit in diesem Bereich bereits festgestellt wurde, lassen sich auf Grund der vielen Voidbereiche in Höhenmodellen, welche aus Aufnahmen mit über 2,2 Monaten Zeitabstand entstanden sind, schlecht Vergleiche ziehen. Deshalb wurden im Profil in Abbildung 61 nur Höhenmodelle aus Aufnahmen mit einem Abstand von kleiner oder gleich 2,2 Monaten zum Vergleich herangezogen.

Im Kronenbereich zeigen die Kombinationen 6-10, 7-10 und 8-7 als einzige Kombinationen Vollständigkeits, welche Vergleichbarkeit schaffen. Analysiert man die Kronenbereiche genauer, stellt sich die Kombination 7-10 (0,8 Monate Abstand) als plausibelste Kombination dar. 6-10 (2,2 Monate Abstand) zeigt in den Kronenbereichen starke Abweichungen von den anderen Kombinationen. 7-8 offenbart in den Kronenbereichen zwar keine großen Abweichungen zu den anderen Kombinationen, besitzt aber auf Grund des Konvergenzwinkels starke Abweichungen auf der Oberfläche. Die euklidische Distanz zum Lidar-Geländemodell an den vergleichbaren Bereichen, mit Ausnahme des Zwischenraums zwischen den beiden Bäumen, ist im Verhältnis zu den Kombinationen 8-10 und 7-8 gering.

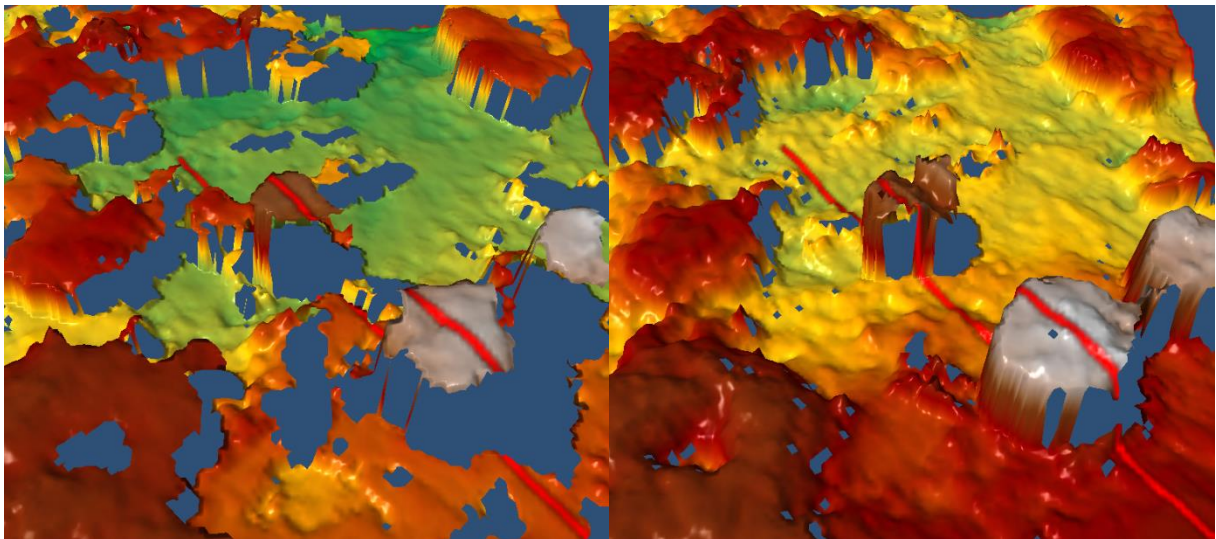


Abbildung 62: Schrägansicht des Bereichs um die Profillinie

Links: Höhenmodell 7-10

Rechts: Höhenmodell 7-8

Farbgebung: Euklidische Distanz zur Lidar-Referenz, von grün (niedrig) bis rot (hoch). Die euklidische Distanz ist in den Baumbereichen so hoch, dass es sich bei der Referenz um ein digitales Geländemodell handelt

Im Vergleich in der 3-D Darstellung in Abbildung 62 wird noch einmal das Rauschen sowie die Höhendifferenz in der Ebene sichtbar (grün gefärbte Oberfläche in 7-10 und gelbliche Oberfläche in 7-8)

6.1.4 Ergebniseinschätzung

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die einzelnen Kombinationen von Höhenmodellen auf statistische und visuelle Weise mit und ohne Referenzdaten analysiert und verglichen. Mangels passender Referenzdaten wurde ein niedrigauflösendes Lidar-Geländemodell als Referenz für bodennahe Bereiche verwendet. Dieses diente zur Einschätzung der vertikalen Abweichungen und der Auswahl eines Höhenmodells mit der geringsten Abweichung. Die statistische Analyse dieses Höhenmodells zeigte keine starken Differenzen innerhalb der getesteten Ausschnitte im bodennahen Bereich. Wie in der visuellen Analyse zahlreicher Profile festgestellt wurde, zeigen die relativen

Abweichungen der einzelnen Höhenmodelle untereinander eine ähnliche Anordnung wie im bodennahen Bereich. Aus diesem Grund, und da sich das Höhenmodell 5-6 als rauschärmstes, sowie plausibelstes Höhenmodell mit einer akzeptablen Vollständigkeit und der niedrigsten Abweichung zum Lidar-Geländemodell erweist, sowie ein in-track Stereopaar darstellt, wird dieses als großflächige zusätzliche Referenz für die Analyse der Höhenmodelle verwendet. Die Analyse der Vollständigkeit wurde in zwei verschiedene Gruppen gegliedert: In einen qualitativen Aspekt (in der statistischen Analyse), sowie in einen quantitativen Aspekt (in der visuellen Analyse).

Analyse der Vollständigkeit

In der statistischen Analyse der erreichten Vollständigkeit wird gezeigt, dass das Ergebnis primär abhängig von den Aufnahmewinkeln der einzelnen Bilder ist und kein Trend bezüglich der Zeitabstände der Einzelaufnahmen der überprüften Höhenmodelle feststellbar ist, da die Testgebiete eine zu heterogene Ausprägung und zu große Ausdehnung besitzen. In der visuellen Analyse der Vollständigkeit wird darauf eingegangen, wie sich einzelne Features in den Kombinationen einzelner Stereomodelle verhalten. Es zeigt sich, dass der zeitliche Abstand den größten Einfluss auf die Oberflächen hat, welche von Vegetation bedeckt sind. Für die Vegetation zeigt sich bei einem Aufnahmeabstand von 20 Tagen wenig bis kaum Einfluss auf die resultierende Vollständigkeit des Höhenmodells. Da die Aufnahmen der zugehörigen Höhenmodelle Anfang Juni und Ende Juni aufgenommen wurden, muss man davon ausgehen, dass die Bäume bereits vollständig ihr Blattwerk ausgebildet haben. Das Ergebnis für etwa 2,2 Monate Abstand zeigt bereits starke Voidbereiche in Rasenbereichen, nach 3 Monaten Zeitabstand ergeben sich auch in vielen Bereichen der Bäume große Voidbereiche. Die Ursache dafür könnte in der fehlenden Robustheit von Rasen gegenüber Dürren liegen. In einem größeren Ausschnitt wurde festgestellt, dass in Bereichen, welche von Bäumen, Büschen und bodennahen Gewächsen bedeckt sind, nach 20 Tagen etwa 88,6 %, nach 2,2 Monaten etwa 78,2 % und nach 3 Monaten nur noch 66,8 % rekonstruiert werden konnten. Als weitgehend invariant gegenüber dieser zeitlichen Veränderung zeigen sich Features wie Dächer, Straßenoberflächen und felsiger bzw. steiniger Boden. Oberflächen, welche großen anthropogenen Einflüssen ausgesetzt sind, wie zum Beispiel die Pferderennbahn in Abbildung 51 oder stark frequentierte Parkbereiche ohne befestigten Untergrund zeigen schon nach 20 Tagen große Defizite in ihrer Vollständigkeit. Einzelne Einflüsse von Features, die in verschiedenen Aufnahmen vorhanden bzw. nicht vorhanden sind, äußern sich unabhängig von der zeitlichen Distanz durch Voidbereiche. In diese Kategorie fallen Fahrzeuge oder bauliche Veränderungen.

Voidbereiche in Abhängigkeit zum Zeitabstand der eingeflossenen Bilder

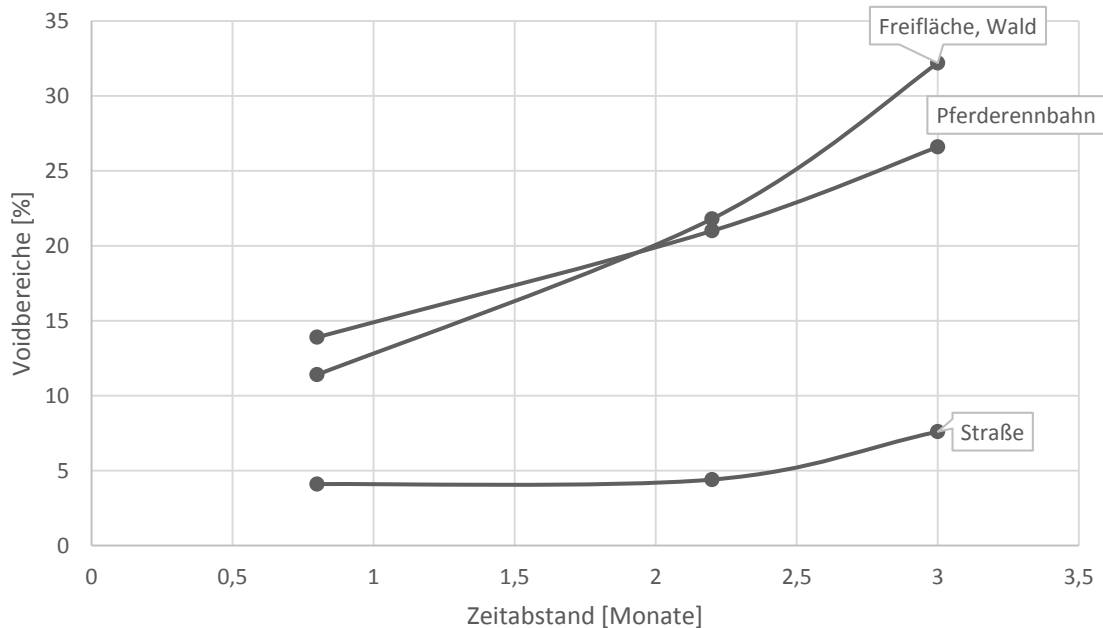


Abbildung 63: Zusammenhang des Anteils der Voidbereiche und des Zeitabstandes der eingeflossenen Bilder

Zwar muss die Aufnahmewinkelkonstellation auf Grund der dadurch entstehenden Verdeckungen in das Ergebnis miteinberechnet werden, da aber in den Oberflächenmodellen mehrheitlich planare Oberflächen verglichen werden, beeinflusst dieser Faktor das Ergebnis nur zu einem geringen Teil. Der Anstieg der Anzahl der Voidbereiche im Ausschnitt „Straße“ von zwei auf drei Monate könnte auch mit dem minimalen Vegetationsanteil an den Straßenrändern zusammenhängen, welcher sich nach 3 Monaten als Voidbereich äußert.

Betrachtet man die Voidbereiche, die betreffende Features in Höhenmodellen verursachen können, können diese mit unterschiedlichem Aufwand durch Postprocessingtechniken ausgeglichen werden. Voidbereiche auf freien Flächen können durch eine Interpolation gefüllt werden. Befinden sich die Voidbereiche jedoch an Grenzen zu Features, die große Höhenunterschiede aufweisen, wie beispielsweise Häuserkanten, Lichtungen oder Kanten im Gelände, würde eine Interpolation diese Features verfälschen und die zugehörige Kante nicht mehr richtig abbilden. Besonders weitreichende Folgen kann eine solche Interpolation in engen Straßenschluchten in urbanen Bereichen haben.

Auswirkungen auf die Qualität

Bezüglich der Qualität der erzeugten Höhenmodelle kann in der statistischen Analyse festgestellt werden, dass es möglich ist, auch aus zwei beziehungsweise drei Bildern verschiedener Aufnahmezeitpunkte, hochwertige Höhenmodelle mit geringen Abweichungen zu einer als visuell und statistisch sehr gut eingeschätzten Referenz zu generieren. Dennoch können aus den Charakteristiken der Abweichungen kein Trend bzw. keine Auswirkungen der zeitlichen Abstände der Einzelbilder festgestellt werden. Die Auswirkungen der Aufnahmewinkelkonfiguration auf die einzelnen Höhenmodelle haben einen zu großen Einfluss und machen somit viele statistische Vergleiche unkenntlich. Ebenso konnten in der visuellen Analyse aus diesem Grund keine eindeutigen Aussagen

getroffen werden. Für einen objektiven Vergleich einer solchen Situation bräuchte man paarweise Aufnahmen verschiedener Zeitpunkte mit äquivalenten Aufnahmewinkeln. Würde eine Untersuchung unter diesen Bedingungen durchgeführt werden, könnten Zusammenhänge zwischen Qualität und temporaler Variation weiter überprüft werden.

6.2 Testgebiet Tripolis

Die Szenen des Testgebiets Tripolis (Libyen) befinden sich im Stadtgebiet von Tripolis und überlappen sich fast komplett. Die Aufnahmen gliedern sich in ein in-track aufgenommenes Triplet vom 18.6.2011 und ein Stereopaar, welches genau ein Jahr zuvor am 18.6.2010 aufgenommen wurde. Die Abdeckung besitzt eine Größe von etwa 17 x 36 km und deckt damit den größten Teil des Stadtgebiets und der Küste ab. Die Aufnahmen stammen ebenfalls wie im Testgebiet Madrid vom Satelliten Worldview-2.

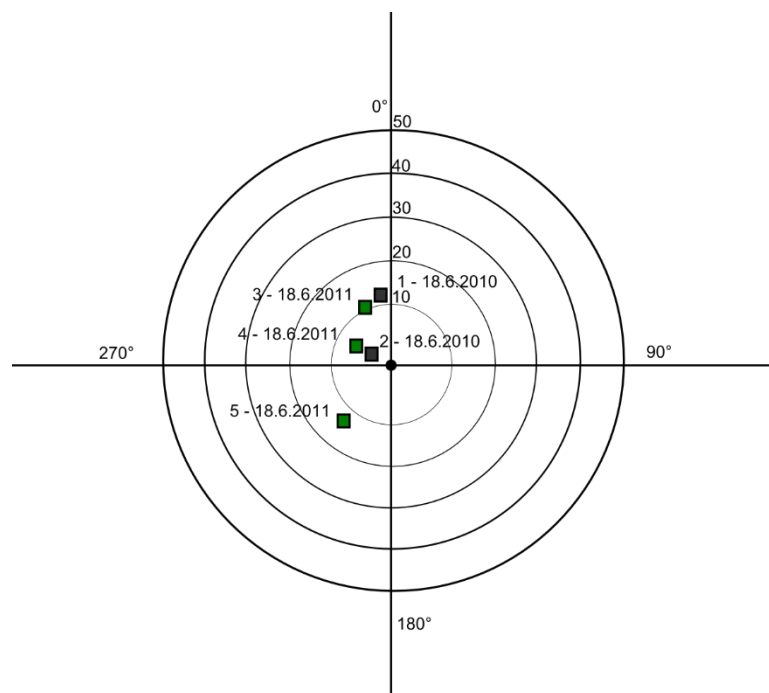


Abbildung 64: Skyplot der verfügbaren Szenen des Testgebiets Tripolis



Abbildung 65: Übersicht des Footprints der Szenen im Testgebiet Tripolis



(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

Abbildung 66: Komplette Ansicht des abgebildeten Gebiets
Multispektralbild mit RGB Farbkanalkombination

6.2.1 Beschreibung der Testdaten

Auffällig an der Aufnahmewinkelkonstellation ist, dass sich die Aufnahmewinkel 3 und 1 bzw. 4 und 2 stark ähneln, jedoch nicht genau gleich sind. Damit lässt sich, wie in der Zusammenfassung des Testgebiets Madrid bereits erwähnt wurde, ein Szenario konstruieren, bei dem eine Aufnahme durch eine an einem anderen Datum aufgenommene Szene ausgetauscht werden kann, ohne dass sich die entsprechenden Stereowinkel stark ändern. Damit können objektivere Vergleiche als im Testgebiet Madrid getroffen werden, die stark durch die Aufnahmewinkel beeinflusst wurden.

Tabelle 12: Metadaten der Aufnahmen

Bezeichnung	Aufnahmedatum	Azimuth [Grad]	Off-Nadir [Grad]
1	18.6.2010	355	11
2	18.6.2010	283	4
3	18.6.2011	344	12
4	18.6.2011	290	6
5	18.6.2011	220	13

Tabelle 13: Übersicht über die möglichen Kombinationen, ihre Stereowinkel und Aufnahmezeitpunkte

Kombination	Konvergenzwinkel [Grad]	Asymmetrie [Grad]	BIE [Grad]	Temporaler Unterschied [Jahre]
1-2	11,7	6,6	82,8	-
1-3	2,7	5,4	77,2	1
1-4	11,2	4,8	81,8	1
1-5	24,8	1,2	84,7	1
2-3	11,9	6,7	81,9	1
2-4	2,3	5,3	84,4	1
2-5	13,1	7,3	81,4	1
3-4	10,9	6,2	80,9	-
3-5	24,7	0,6	83,3	-
4-5	13,8	6,1	81,0	-
1-2-5				
1-2	11,7	6,6	82,8	-
2-5	13,1	7,3	81,4	1
1-5	24,8	1,2	84,7	1
1-4-5				
1-4	11,2	4,8	81,8	1
1-5	24,8	1,2	84,7	1
4-5	13,8	6,1	81,0	-
3-2-5				
2-3	11,9	6,7	81,9	1
3-5	24,7	0,6	83,3	-
2-5	13,1	7,3	81,4	1
3-4-5				
3-4	10,9	6,2	80,9	-
3-5	24,7	0,6	83,3	-
4-5	13,8	6,1	81,0	-

Klimatische Einflüsse

Klimadiagramm von Tripolis

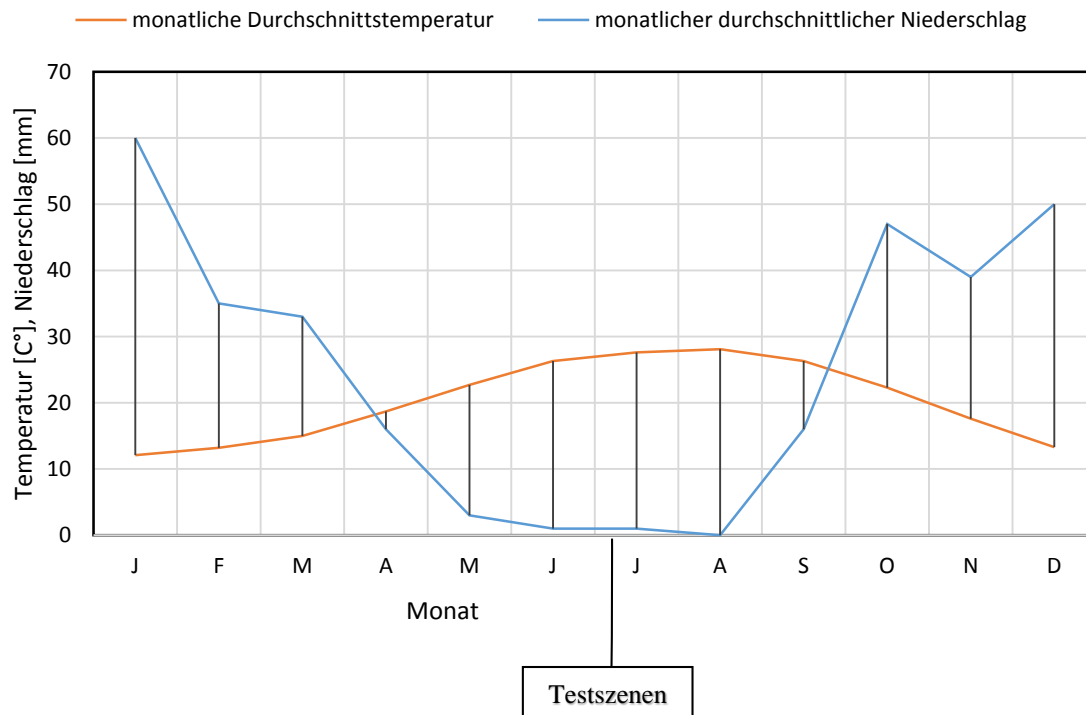


Abbildung 67: Klimadiagramm von Tripolis

Tripolis besitzt als nordafrikanische Stadt mit Anschluss an das Meer etwas gemäßigte Temperaturen als weiter im Süden liegende Städte Libyens. Mit sehr geringem Niederschlag über das ganze Jahr hinweg, fällt besonders in den Sommermonaten kaum Regen. Diese absolut trockenen Monate wirken sich auf die vorherrschende Vegetation aus – es siedeln sich hauptsächlich robuste Pflanzen, wie Sukkulente, Kakteen oder krautartige Büsche an. Zu den Baumarten gehören primär Arten, welche in einer mediterranen Vegetation und in der Savanne vorkommen.

Behandelte Ausschnitte

Da in der Analyse des Testgebietes Madrid unter anderem festgestellt wurde, dass heterogen aufgebaute Bildausschnitte ein verfälschtes Ergebnis liefern können, werden in dieser Analyse primär Bildausschnitte betrachtet, die eine weitgehend homogene Oberflächenbedeckung zeigen. Dazu wurden folgende Bildausschnitte zusammengestellt:

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved



Abbildung 68: Ausschnitte im Testgebiet Tripolis

1: „Brachland“

2: „Industrie“

3: „Vegetation“

4: „Wohngebiet“

5: „Flughafen“

Da für das Testgebiet Tripolis keine Referenzdaten verfügbar waren, soll dies nur mit einer visuellen Analyse genauer überprüft werden. Im Teil der statistischen Analyse wird die erreichte Completeness der Testgebiete und aller Kombinationen präsentiert. Besonderen Wert wird dabei auf die Vergleiche der Stereokombinationen gleichen Datums 1-2, 3-4, sowie den vermischten Kombinationen 1-4 und 3-2 mit einem Jahr Abstand und ähnlichen Aufnahmewinkelkonstellationen gelegt. Da sich im in-track Triplet 3-4-5 jeweils die Szene 3, 4 oder beide durch die Szenen 1 und 2 ersetzen lassen, soll auch hier untersucht werden, welche Auswirkungen dies hat.

6.2.2 Statistische Analyse

Vollständigkeiten der Testgebiete und Kombinationen

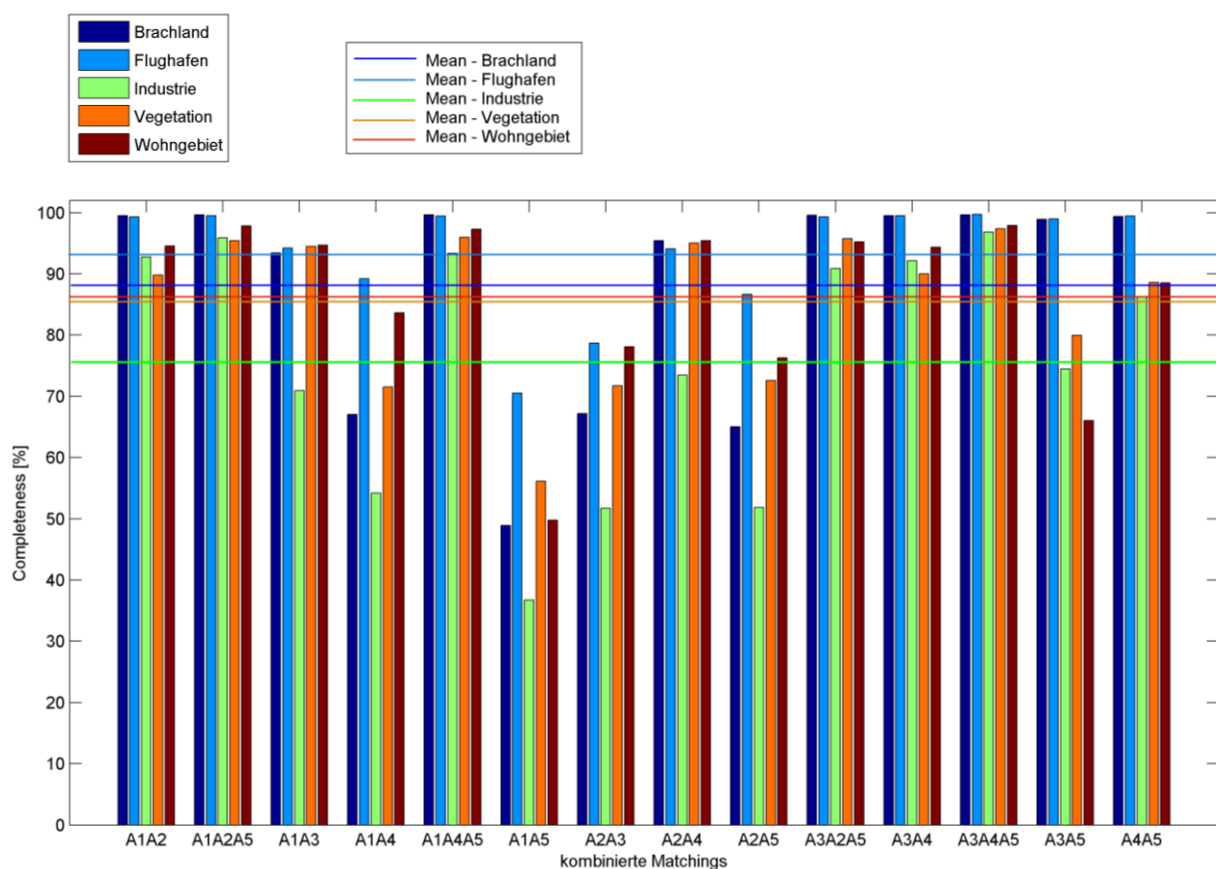


Abbildung 69: Vollständigkeiten der Testgebiete bzw. Kombinationen im Testgebiet Tripolis

Betrachtet man zunächst die in-track Kombinationen 1-2 und 3-4, welche unter ähnlichen Winkelbedingungen aufgenommen wurden, zeigt sich die zu erwartende Ähnlichkeit der Ergebnisse. Sie unterscheiden sich nur um etwa 0,3%. Ersetzt man jeweils eine Szene dieser beiden Kombinationen mit der jeweiligen Szene, die dieser bezüglich ihrer Winkel am ähnlichsten ist, erhält man die Kombinationen 1-4 und 3-2. Die Ergebnisse dieser beiden Kombinationen erzielen im Testgebiet „Flughafen“ in 1-4 eine etwa 10 % und in 3-2 eine etwa 20 % schlechtere Vollständigkeit. Ähnlich verhält es sich im Testgebiet „Wohngebiet“. Im Testgebiet „Vegetation“ erreichen beide Kombinationen eine Vollständigkeit von etwa 72 %, also rund 21 % weniger als im in-track Fall. Am schlechtesten schneiden die Kombinationen im Gebiet „Industrie“ ab, bei denen nur etwa eine 53 prozentige Vollständigkeit in Kombination 1-4 und 3-2 erreicht wird.

Da sich die Aufnahmewinkel untereinander um wenige Grade unterscheiden, könnte das etwas schlechtere Abschneiden der Kombination 2-3 auf den minimal höheren Konvergenzwinkel bzw. auf die größere Aufnahmeasymmetrie der Kombination zurückgeführt werden.

Betrachtet man die Auswirkungen auf die Vollständigkeit eines Triplets beim Austauschen einer oder zweier Szenen, ergeben sich folgende Ergebnisse für das in-track Triplet 3-4-5 und für die in-track Stereo-Mono Kombinationen 1-2-5, 1-4-5 und 3-2-5:

Das in-track Triplet 3-4-5 erreicht in allen Testgebieten mindestens eine Vollständigkeit von etwa 97 %. 1-2-5 erzielt minimal schlechtere Ergebnisse mit einer um 2 % geringeren Vollständigkeit in den Testgebieten „Industrie“ und „Vegetation“. Die Triplets 1-4-5 und 3-2-5 erhalten eine um etwa 2-3 % geringere Vollständigkeit als 1-2-5. Inwiefern man qualitative Unterschiede innerhalb dieser Kombinationen erkennen kann, wird in der folgenden visuellen Analyse präsentiert.

6.2.3 Visuelle Analyse

Vergleicht man die Konvergenzwinkel der in-track Kombinationen 1-2, 3-4 und die ähnlichen across-track Kombinationen 2-3 und 1-4, eignen sich für einen möglichst objektiven Vergleich - in der Form „in-track gegen across-track“ - besonders die Paare 1-2 und 2-3 ($C_{1-2} = 11,7$, $C_{2-3} = 11,9$). Die Asymmetriewinkel und BIE-Winkel sind ebenfalls so ähnlich, dass sie für einen Vergleich der Höhenmodelle vernachlässigt werden können.

Im Folgenden werden jeweils Ausschnitte der Testgebiete mit den Kombinationen 1-2 und 2-3 sowie die entsprechenden Orthobilder für einen optischen Vergleich dargestellt. Dabei wird auf das Orthobild 1 verzichtet, da es keine großen Unterschiede zu Orthobild 2 aufweist. Denn beide Bilder wurden quasi gleichzeitig aufgenommen. Zudem passen die Aufnahmewinkel von 1 zu 3 nicht so gut wie die von 2.

Wohngebiet



Abbildung 70: Präsentation des Ausschnitts „Wohngebiet“

1: Höhenmodell 1-2

2: Höhenmodell 2-3

Die Höhenmodelle sind jeweils gestreckt auf die zweifache Standardabweichung, Weiß: Voidbereiche

3: Panchromatisches Orthobild 2

4: Panchromatisches Orthobild 3

(Orthobilder mit einem Abstand von einem Jahr zueinander)

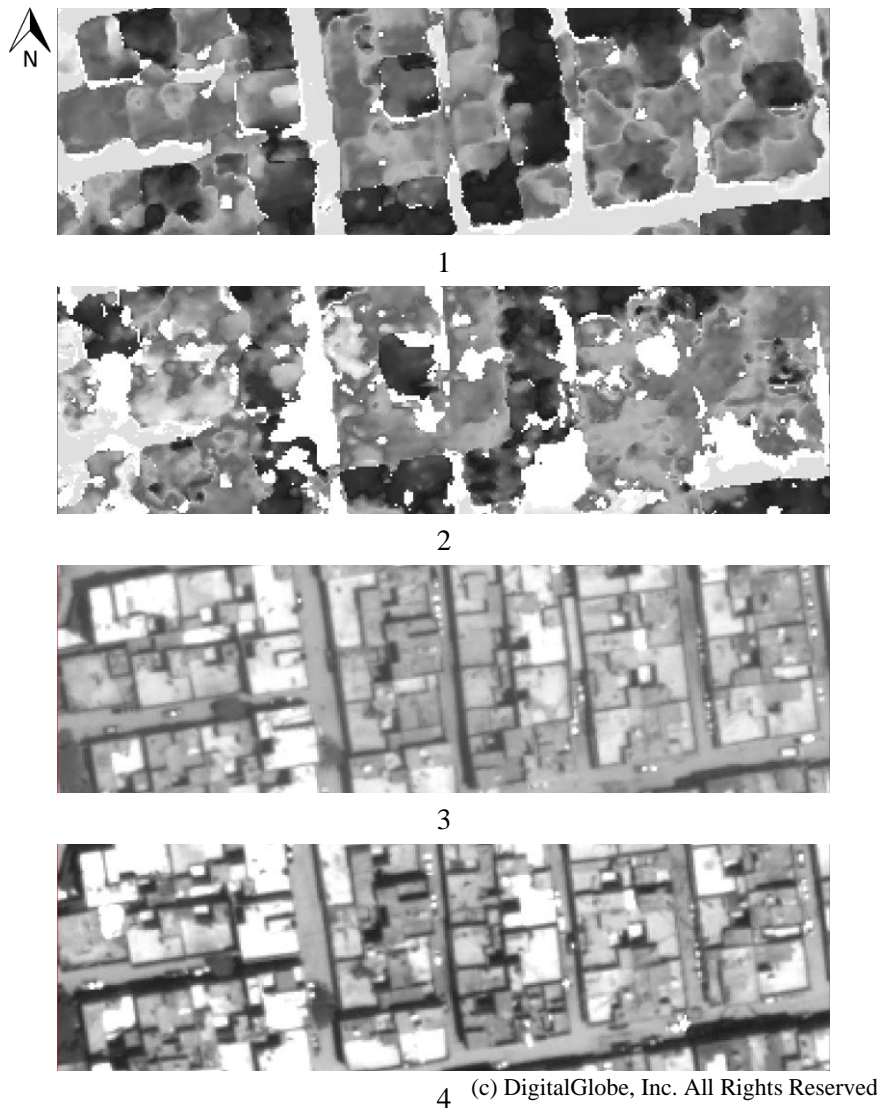


Abbildung 71: Detailausschnitt des Testgebiets „Wohngebiet“

1: Höhenmodell 1-2

2: Höhenmodell 2-3

Die Höhenmodelle sind jeweils gestreckt auf die zweifache Standardabweichung, Weiß: Voidbereiche

3: Panchromatisches Orthobild 2

4: Panchromatisches Orthobild 3

(Orthobilder mit einem Abstand von einem Jahr zueinander)

In der Übersicht kann beobachtet werden, dass ein großer Anteil der resultierenden Voidbereiche durch Gebäude und Oberflächen verursacht werden, welche starke Unterschiede aufweisen. Der größte Anteil der Voidbereiche befindet sich auf Verkehrswegen.

Verwendet man einen kleineren Ausschnitt, und betrachtet einzelne Gebäude, fällt ein verstärktes Rauschen auf Gebäudedächern und Oberflächen auf. Dabei ist die Abbildung von Kanten, soweit dies durch die erschwerte Beobachtung auf Grund der geringeren Vollständigkeit zu erkennen ist, nur minimal schlechter. Viele Gebäude weisen minimale Veränderungen auf, welche besonders auf den waagrechten Dächern des Wohngebiets sichtbar werden.

Vegetation

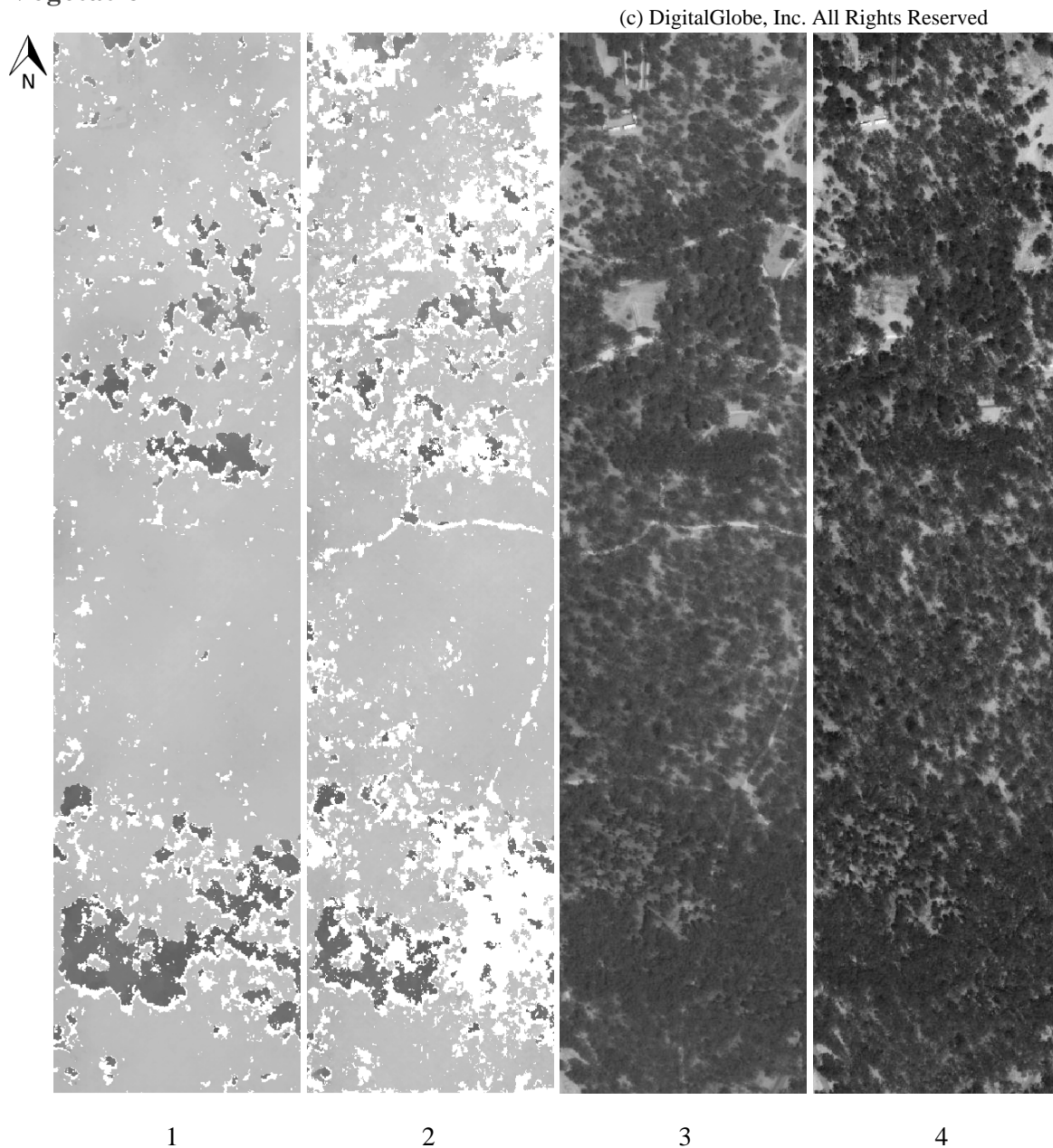


Abbildung 72: Präsentation des Ausschnitts „Vegetation“

1: Höhenmodell 1-2

2: Höhenmodell 2-3

Die Höhenmodelle sind jeweils gestreckt auf die zweifache Standardabweichung, Weiß: Voidbereiche

3: Panchromatisches Orthobild 2

4: Panchromatisches Orthobild 3

(Orthobilder mit einem Abstand von einem Jahr zueinander)

Im Testgebiet „Vegetation“ wurde überraschenderweise die bodennahe Vegetation fast vollständig im across-track Höhenmodell 2-3 rekonstruiert. Die dichtere bzw. höhere Vegetation scheint von der starken zeitlichen Veränderung mehr betroffen zu sein. Es könnte sich bei der bodennahen Vegetation um niedrige, immergrüne Sträucher oder um kaktusenartige, robuste Gewächse handeln, die nur langsam wachsen. Die einzige auffällige Veränderung zwischen den Bildern, welche mit bloßem Auge zu erkennen ist, stellt der Weg dar. Dieser ist zwar im Bild A2 vorhanden, im Bild A3 ist er jedoch nicht mehr zu erkennen. Betrachtet man die Höhenmodelle 1-2 und 2-3 in der 3D- oder in der Profilansicht

(Abbildung 74), wird wieder das verstärkte Rauschen deutlich, welches im across-track Höhenmodell 2-3 vorherrscht.

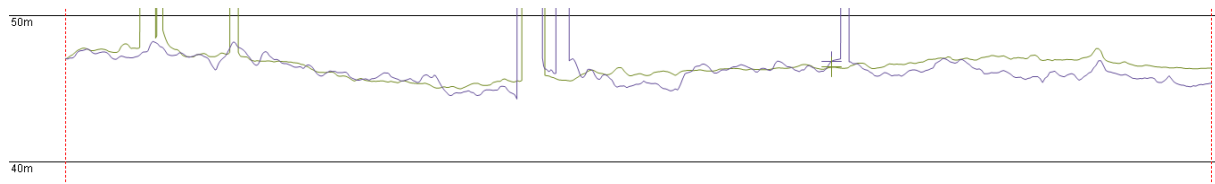


Abbildung 73: Profilansicht eines Profils im Testgebiet „Vegetation“

(3-fach überhöht)

Grün: Höhenmodell 1-2,

Lila: Höhenmodell 2-3.

Die senkrechten Linien kennzeichnen Voidbereiche

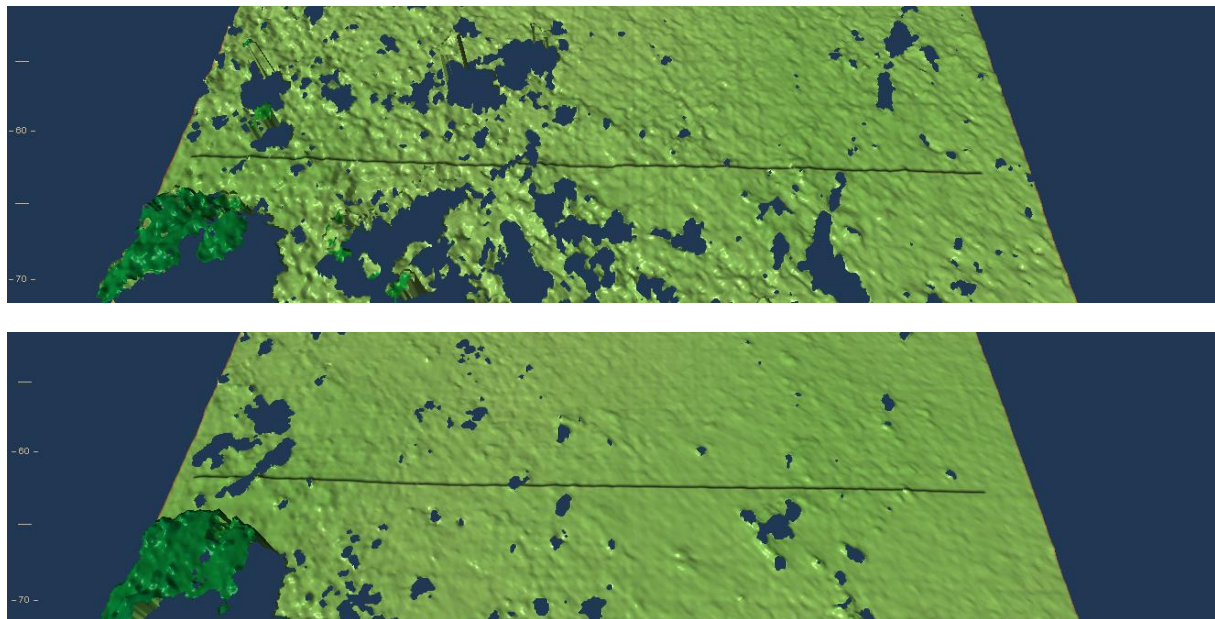


Abbildung 74: 3D-Ansicht eines Detailausschnitts mit Profillinie

Oben: Höhenmodell 2-3

Unten: Höhenmodell 1-2

Die Profillinie von Abbildung 73 ist als schwarzer Strich eingezeichnet.

Industrie

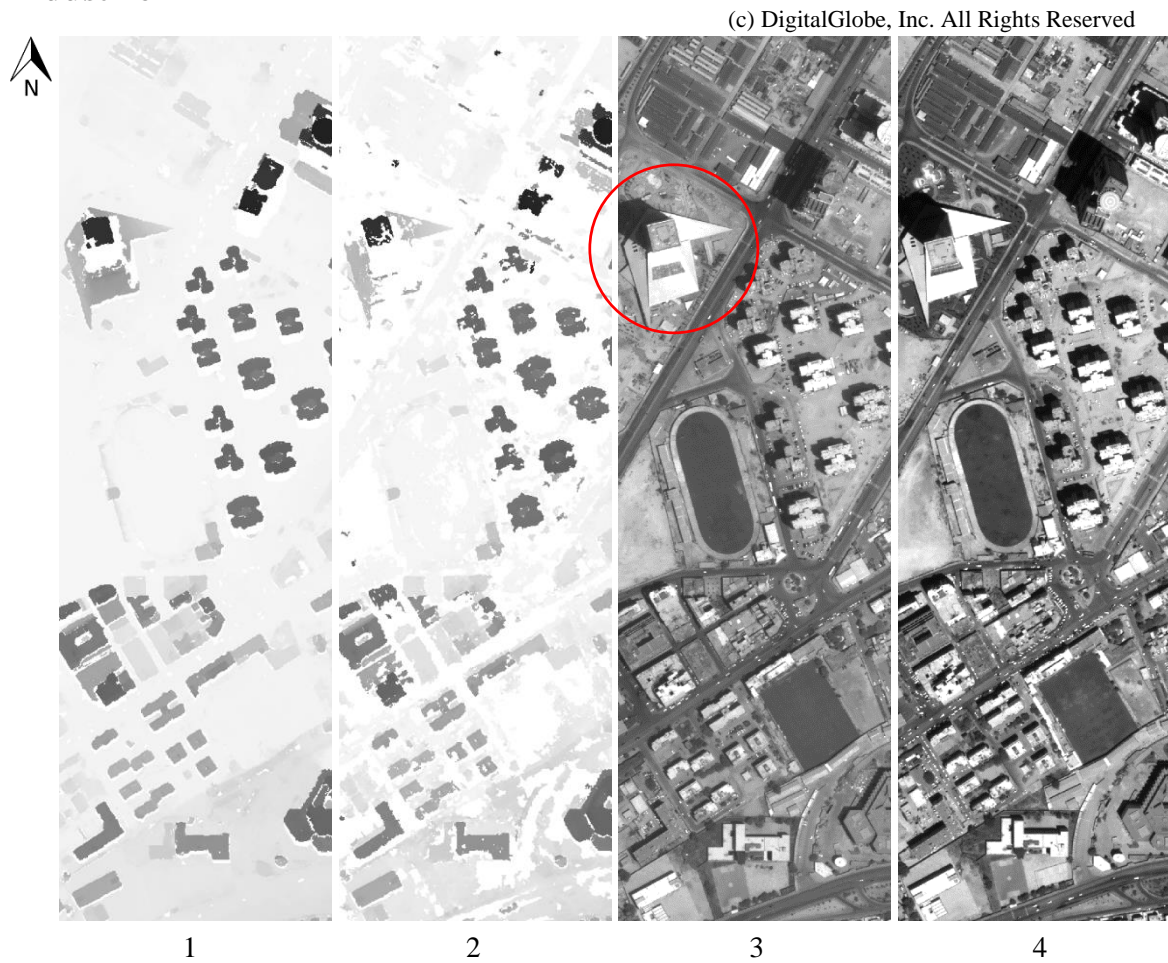


Abbildung 75: Präsentation des Ausschnitts „Industrie“

1: Höhenmodell 1-2

2: Höhenmodell 2-3

Höhenmodelle ungestreckt, Weiß: Voidbereiche

3: Panchromatisches Orthobild 2

4: Panchromatisches Orthobild 3

(Orthobilder mit einem Abstand von einem Jahr zueinander)

Rote Markierung: Markantes Gebäude im Bau

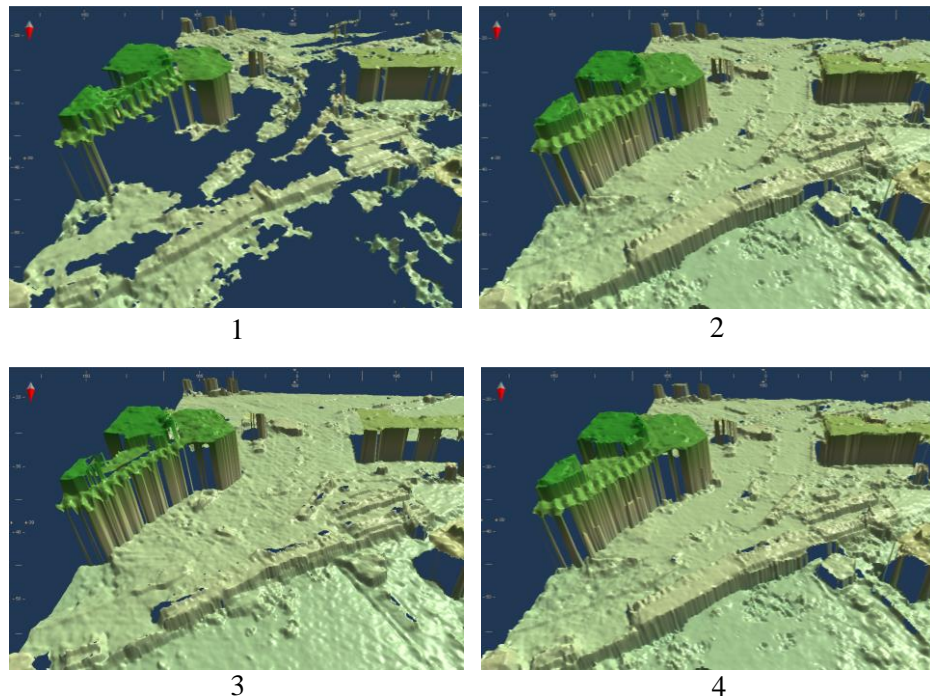


Abbildung 76: 3D-Ansicht eines Detailausschnitts des Testgebiets „Industrie“

- 1: Höhenmodell 2-3
- 2: Höhenmodell 1-2
- 3: Höhenmodell 3-4-5
- 4: Höhenmodell 1-4-5

Im gesamten Testgebiet „Industrie“ treten besonders auf Oberflächen große Voidbereiche auf. Bei diesen Oberflächen handelt es sich überwiegend um unbefestigte Oberflächen – asphaltierte Oberflächen beinhalten kaum Voidbereiche. Viele Oberflächen sind großer Dynamik unterworfen, wie zum Beispiel die Oberfläche, welche das markante, große Gebäude im Nordwesten umringt. In den Orthobildern wird die Veränderung deutlich sichtbar. Ebenso sind einzelne Gebäude nicht oder nur partiell rekonstruiert. Auffällig ist auch die geringe Menge an Verkehrswegen, die rekonstruiert werden können. Dies ist jedoch hauptsächlich durch den starken Verkehr zu begründen.

In der dreidimensionalen Ansicht in Abbildung 76 kann man eine geringe Veränderung der Kantenschärfe an Gebäudekanten erkennen, die aber im größten Teil der Bereiche vernachlässigbar gering ist. Rauschen wird auf diesem Ausschnitt besonders auf den Oberflächen sichtbar. Die Oberfläche im Vordergrund ist ein begrünter Sportplatz, welche nach anthropogenen Einflüssen sowie nach natürlichen Veränderungen innerhalb eines Jahres nicht mehr rekonstruiert werden konnte. Details sind auch im across-track Höhenmodell gut sichtbar. Es kann keine Tendenz zu einer Verschlechterung in diesem Testgebiet festgestellt werden.

In den across-track erzeugten Triplet-Kombinationen kann ein minimal höheres Rauschen festgestellt werden. Das Rauschen tritt primär in Bereichen auf, in welchen das along-track Stereopaar der Kombination Verdeckungen bzw. Voids aufweist. Die Abbildung der Kanten ist nahezu gleich gut wie in along-track Triplets.

Brachland

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

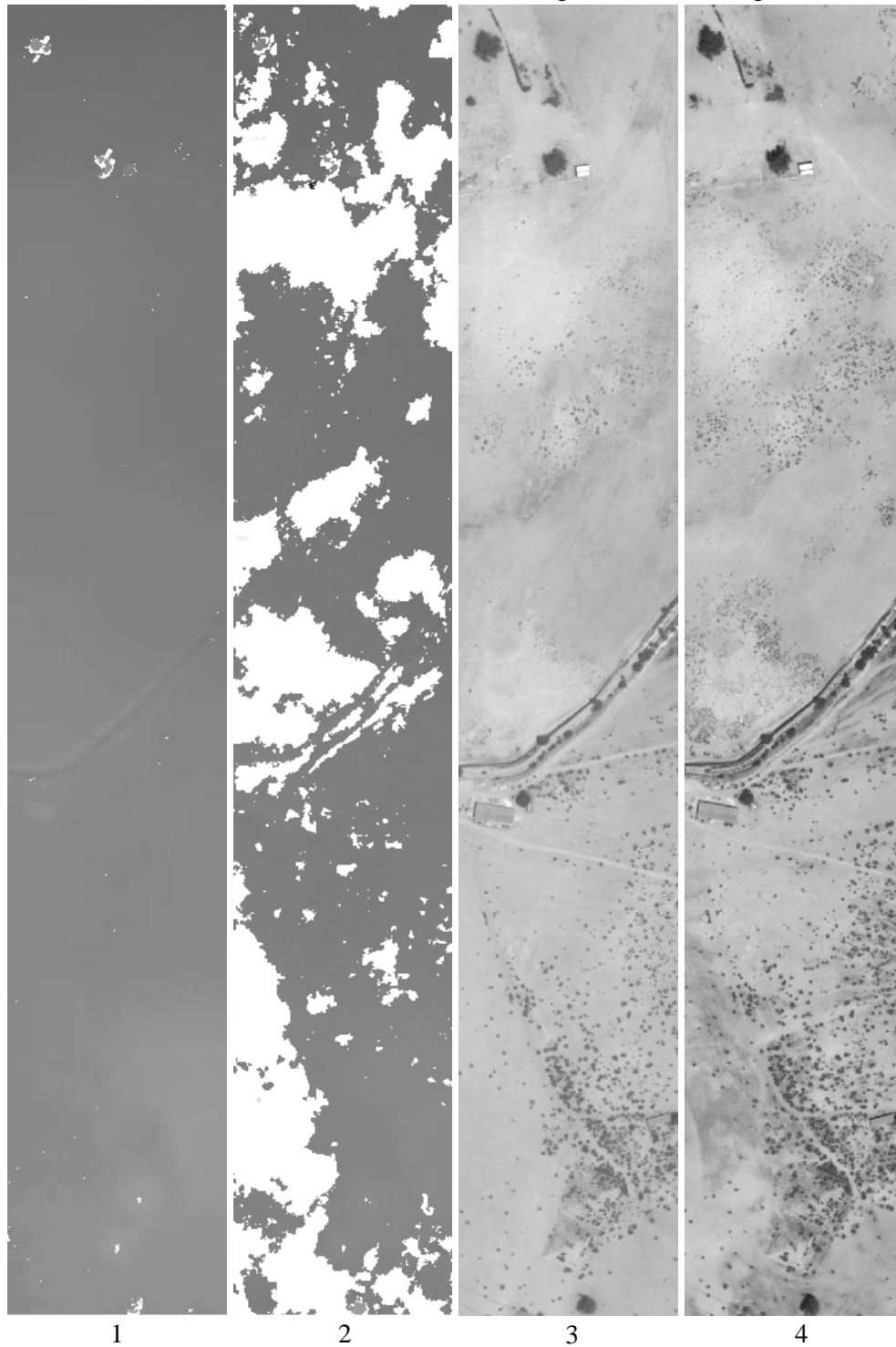


Abbildung 77: Präsentation des Ausschnitts „Brachland“

1: Höhenmodell 1-2

2: Höhenmodell 2-3

Höhenmodelle ungestreckt, Weiß: Voidbereiche

3: Panchromatisches Orthobild 2

4: Panchromatisches Orthobild 3

(Orthobilder mit einem Abstand von einem Jahr zueinander)

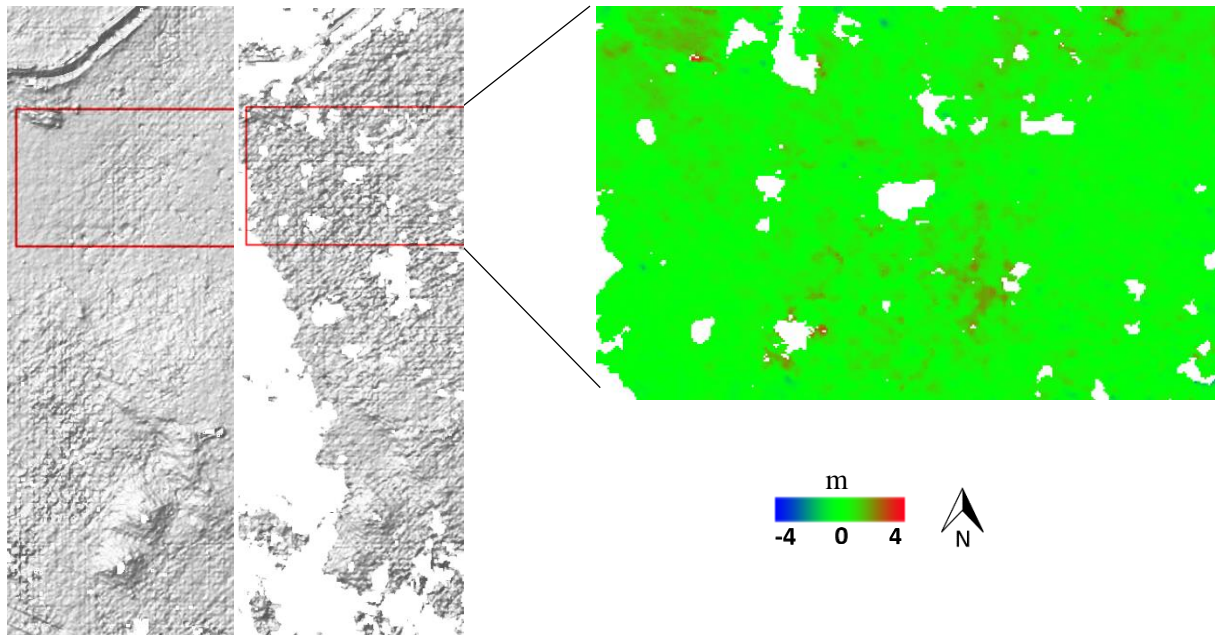


Abbildung 78: Detailansicht eines Ausschnitts im Testgebiet „Brachland“

Links: Schummerung eines Ausschnitts des Höhenmodells 1-2

Mitte: Schummerung eines Ausschnitts des Höhenmodells 2-3

(In kontinuierlicher Einfärbung ohne Streckung)

Rot: Footprint des Differenzbildes

Rechts: Differenzbild eines Ausschnitts der Höhenmodelle 1-2 und 2-3

Farbskala von -4m bis +4m skaliert

Auf den weiträumigen Freiflächen des Brachlandes ist ein deutlicher Unterschied des Bewuchses auf beiden Orthobildern zu erkennen. In den Bereichen, welche im Bild A3 deutlich mehr Vegetation aufweisen, können nur wenige Korrespondenzen gefunden werden. Die übrige, wüstenähnliche Oberfläche kann gut rekonstruiert werden. In Abbildung 78 kann durch die Schummerung ein erhöhtes Rauschen festgestellt werden. Die Amplituden dieses Rauschens befinden sich etwa bei 30-40 cm, während das Rauschen im Bild 1-2 bis etwa 30 cm auslenkt. In den übrigen Bildern bewegt sich das Rauschen in ähnlichen Größenordnungen.

In den Triplet-kombinationen lässt sich in der Kombination 2-3-5 direkt hinter 3-4-5 (was jedoch das reine in-track Triplet darstellt) das geringste Rauschen feststellen. Die Ursache dieser Entwicklung liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit, ähnlich wie im Testgebiet „Industrie“, am hohen Konvergenzwinkel des Stereopaars 3-5, welches im Triplet 2-3-5 enthalten ist. Bei näherer Untersuchung fällt auf, dass sich das Rauschen primär in jenen Bereichen befindet, die in 3-5 Voidbereiche darstellen.

Flughafen

(c) DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved

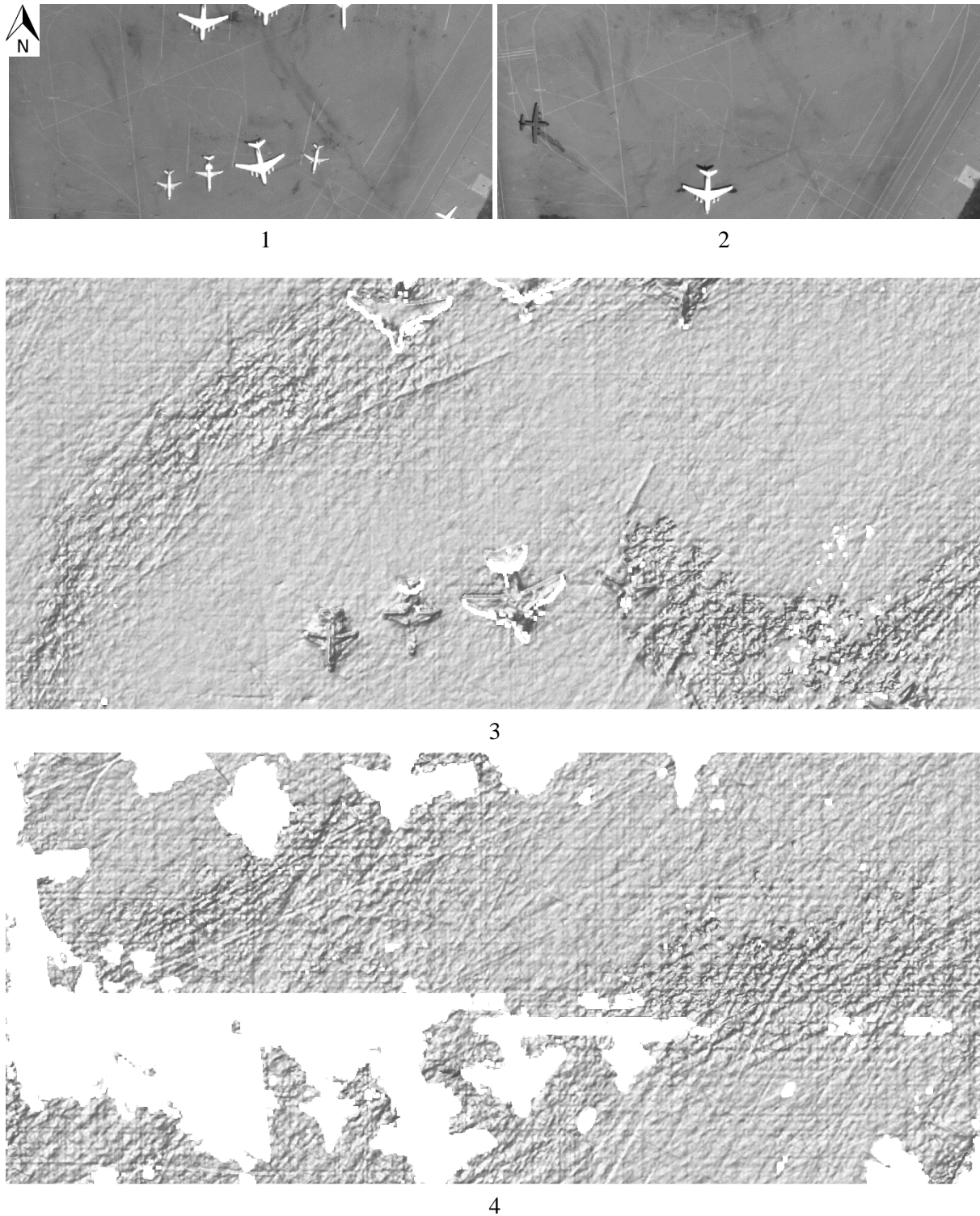


Abbildung 79: Präsentation des Ausschnitts „Flughafen“

- 1: Panchromatisches Orthobild 2
- 2: Panchromatisches Orthobild 3
- (mit einem Abstand von einem Jahr zueinander)
- 3: Schummerung des Höhenmodells 1-2
- 4: Schummerung des Höhenmodells 2-3

Auch im Testgebiet „Flughafen“ bestätigt sich eine leichte Erhöhung des Rauschens. Dabei sind manche Bereiche, wie der östliche Teil des Testgebiets stärker betroffen. Eine Ursache dafür kann in den Orthobildern nicht gefunden werden. Im Südwesten des Testgebiets konnte durch einen Fehler nicht der komplette Bereich rekonstruiert werden. Dieser Fehler tritt jedoch nur in der Kombination 2-3 auf. In allen anderen Kombinationen konnten die Bereiche komplett rekonstruiert werden.

Vergleicht man die vorgeschlagenen Triplet-Kombinationen, fallen in diesem Testgebiet keine Qualitätsunterschiede oder eine starke Erhöhung des Rauschens auf. Die Abbildung der Rollbahn ist in allen Triplets von ähnlicher Qualität.

6.2.4 Ergebniseinschätzung

Mit den Testdaten Tripolis konnte ein Szenario untersucht werden, welches einen direkten Vergleich von Stereopaaren mit ähnlicher Aufnahmewinkelkonstellation und einem Zeitunterschied von einem Jahr ermöglicht. Da keine Referenzdaten für dieses Gebiet verfügbar sind, können nur Aussagen bezüglich der Vollständigkeit und bestimmter Effekte mit Hilfe einer visuellen Analyse getroffen werden. Dennoch lassen sich dabei Beobachtungen bestätigen, welche im Testgebiet Madrid gemacht wurden. Dazu zählen die Auswirkungen von Vegetation, unbefestigten Oberflächen und anthropogenen Eingriffen, welche sich nach einem Jahr noch stärker auf die Vollständigkeit auswirken. Ebenso konnte ein deutliches Rauschen in den Höhenmodellen entdeckt werden, bei denen die Szenen mit einem Jahr Unterschied aufgenommen wurden. In den Höhenmodellen des Testgebiets Tripolis konnten hingegen durch den hohen Zeitabstand von einem Jahr auch Einflüsse von längerfristigen Veränderungen beobachtet werden. Diese traten insbesondere an Oberflächen auf, die einem großen anthropogenen Einfluss unterliegen. Zur Beobachtung standen Sportplätze, innerstädtische unbefestigte Oberflächen (zum Beispiel an Baustellen), urbane Grünanlagen, Parks und Beete. Diese Features wurden bereits im Testgebiet Madrid bei Höhenmodellen mit einem Zeitabstand von 2,2 und 3 Monaten als schlecht bis gar nicht rekonstruierbar eingeschätzt. Brachliegende Bereiche, welche keinen erkennbaren Einflüssen des Menschen unterworfen sind, lassen sich auch mit einem Zeitunterschied von einem Jahr zwischen den Szenen, zu einem großen Anteil rekonstruieren.

Oberflächen, welche mit Vegetation bedeckt sind, verhalten sich, wie auch im Testgebiet Madrid, unterschiedlich. Es kann, wie im Ausschnitt „Brachland“, vorkommen, dass sich innerhalb der langen Zeit eines Jahres Pflanzen ansiedeln. Dabei ist es irrelevant, ob es sich bei diesen Pflanzen um niedrigen Bodenbewuchs oder Büsche handelt – die entsprechenden Bereiche können nicht mehr rekonstruiert werden. Ebenso ist es möglich, Oberflächen, welche zwar durch Vegetation bedeckt sind, diese Vegetation aber weder zu dicht noch zu hoch ist, zu rekonstruieren (Ausschnitt „Vegetation“). Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind das Klima des Testgebiets und die daraus resultierenden Vegetationsarten Ursachen dafür, dass die Vegetation auch nach einem Jahr rekonstruiert werden kann. Auf Grund der Tatsache, dass die Aufnahmen in den Sommermonaten aufgenommen wurden, in welchen kaum Niederschlag fällt, ist es wahrscheinlich, dass die Pflanzen ihr Blattwerk nicht mehr entfaltet haben. Dadurch ist vermutlich auch mehr Oberfläche zu erkennen. Bei Rasenflächen und innerstädtischer Begrünung kann man im Ausschnitt „Industrie“ erkennen, dass in dieser, vom anthropogenen Eingriff stark abhängigen Vegetation, kaum Korrespondenzen gefunden werden konnten.

Brachliegende Oberflächen sind ebenfalls stark abhängig von anthropogenen Einflüssen. Im Ausschnitt „Wohngebiet“ sind zahlreiche Straßen und Plätze ersichtlich, die eine unbefestigte Oberfläche

aufweisen. Diese konnten unter den annähernd gleichen Aufnahmewinkeln und mit einem Jahr Unterschied zwischen den Szenen nicht rekonstruiert werden. Anders verhält es sich bei brachliegenden Oberflächen, die keinem oder nur einem geringen anthropogenen Einfluss ausgesetzt sind. Im Ausschnitt „Brachland“ konnte ein großer Teil der Oberfläche rekonstruiert werden, mit Ausnahme der zuvor beschriebenen Bereiche, in welchen sich neue Vegetation angesiedelt hatte.

Befestigte Oberflächen und Gebäudedächer ohne große bauliche Veränderung konnten dagegen zu einem großen Teil gut rekonstruiert werden. Schwieriger gestaltete es sich bei Straßen. Diese konnten nur teilweise wiederhergestellt werden.

Im Gegensatz zum Testgebiet Madrid, welches in seinen Eingangsszenen einen maximalen Zeitunterschied von 3 Monaten aufwies, konnte in allen Testausschnitten von Tripolis ein Rauschen festgestellt werden, welches in den across-track erzeugten Höhenmodellen aufgetreten ist.

7 FAZIT UND AUSBLICK

Wie im Kapitel „Ziel der Arbeit“ bereits aufgezeigt, zielte die Arbeit darauf ab, eine Aussage über die Qualität von across-track erzeugten Höhenmodellen zu finden und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie ein Tasking bzw. die Vorbereitung zur Akquise der Daten verändert werden kann, wenn across-track Szenen verwendet werden. Die Chance, Archivdaten für die Erstellung hochwertiger Höhenmodelle anstatt along-track erzeugter Höhenmodelle zu verwenden, wurde in dieser Arbeit in Bezug auf mediterrane und aride Gebiete ausgiebig geprüft. Die Ergebnisse, die mit Hilfe des semi-global Matching Algorithmus und robusten Ähnlichkeitsmaßen mit Aufnahmen verschiedener Zeitpunkte des Satelliten Worldview-2 erreicht werden konnten, wurden statistisch und visuell evaluiert. Dazu wurden in der statistischen Analyse im Testgebiet Tripolis die Residuen zu einem Referenzgeländemodell auf unterschiedliche Weise mit robusten statistischen Methoden überprüft. In der visuellen Analyse wurden verschiedene along- und across-track Kombinationen mit passenden Werkzeugen und Darstellungsformen analysiert und präsentiert. Es zeigte sich bei diesen Analysen, dass Features, die für die Konstruktion von Stadtmodellen oder für die Ableitung digitaler Geländemodelle relevant sind, auch bei zeitlichen Abständen von mehreren Monaten ausreichend gut rekonstruiert werden konnten. Primär wirkt sich der zeitliche Abstand auf die Vollständigkeit des resultierenden Höhenmodells aus. Dabei nimmt dieser Abstand auf unterschiedlich starke Weise Einfluss auf verschiedene Features. Aus den Erkenntnissen der Analysen ergeben sich einige Empfehlungen für eine kostenneutrale oder kostenreduzierte Planung zur Erstellung von Höhenmodellen, welche im Folgenden zusammengefasst werden.

Aussage über die Qualität across-track erzeugter Höhenmodelle

Über die Qualität across-track erzeugter Höhenmodelle kann nur für Gebiete, welche sich in mediterranen und ariden bzw. semiariden Klimazonen befinden, eine Aussage getroffen werden. Da keine passenden Testdaten für gemäßigte Regionen verfügbar waren, konnten diese auch nicht überprüft werden. Es besteht deshalb in der Überprüfung solcher Gebiete weiterhin Bedarf. In der Analyse ließ sich feststellen, dass sich der temporale Abstand von Aufnahmen für ein Höhenmodell primär auf die Vollständigkeit des resultierenden Modells auswirkt.

Dabei wurden zahlreiche Features untersucht, die abhängig vom Zeitunterschied der Aufnahmen verschiedene Auswirkungen auf die Vollständigkeit besaßen. Besonders Features auf der Oberfläche, welche wenig Texturierung und einen geringen Farbintensitätsunterschied aufwiesen, sowie einem starken anthropogenen Einfluss ausgesetzt waren, zeigten schlechte Quoten bezüglich ihrer erreichten Vollständigkeit. In den Testgebieten fielen dabei beispielsweise Sportplätze, unbefestigte Straßen, Plätze sowie Stadtparks auf. Dieser Effekt resultiert mit einer hohen Wahrscheinlichkeit aus den geringen Grauwertunterschieden, welche sich selbst innerhalb kurzer Zeit auf Grund minimaler Einflüsse in zufälliger Manier neu anordnen und dadurch schwer rekonstruiert werden können. Diese Features zeigten schon nach etwa zwei Monaten, abhängig vom anthropogenen Einfluss, schlechte Vollständigkeitsraten. Da es sich bei solchen Oberflächen jedoch meist um planare Flächen handelt, können diese in vielen Fällen durch Interpolation gut ausgeglichen werden. Oberflächen, welche keinem anthropogenen Einfluss unterworfen sind, weisen dagegen selbst nach einem Zeitraum von einem Jahr kaum Einbußen auf. Weitgehend invariant gegenüber dem zeitlichen Einfluss erwiesen sich befestigte Features, wie zum Beispiel Gebäude und asphaltierte Oberflächen.

Neben diesen Effekten, welche nur die Vollständigkeit betreffen, kann bei Höhenmodellen aus Szenen mit einem Zeitunterschied von einem Jahr ein erhöhtes Rauschen festgestellt werden. Dieses Rauschen ist zwischen 10 - 30 cm höher als das Grundrauschen des Höhenmodells.

Bezüglich der Qualität von across-track Höhenmodellen kann deshalb zusammenfassend gesagt werden, dass die Abbildungsqualität von vielen Features nach einem Zeitabstand von etwa 3 Monaten noch nicht stark beeinflusst wird. Die Vollständigkeit der Features hängt jedoch unterschiedlich stark vom Zeitabstand der Eingangsszenen ab.

Empfehlungen für eine Planung bzw. für ein Tasking mit across-track erzeugten Höhenmodellen

Da bei der Erzeugung von Höhenmodellen die verschiedenen Anwendungszwecke der Höhenmodelle unterschiedliche Qualitätsanforderungen stellen, können für eine Planung und für ein eventuelles Tasking mehrere Empfehlungen abgegeben werden.

Der Hauptanwendungszweck hochauflösender digitaler Oberflächenmodelle ist die Abbildung urbaner Bereiche. Eine Empfehlung dafür ist, auf mindestens eine der meist verwendeten drei along-track Aufnahmen zu verzichten.

Spielt die Aktualität eine Rolle, reicht eine along-track Stereo-Neuaufnahme mit einer guten Winkelkombination, die eine nadirnahe Aufnahme enthält, in Kombination mit einer (für eine günstigere Datenakquise) bzw. zwei ergänzenden Aufnahmen aus dem Archiv (für eine kostenneutrale Datenakquise) aus. Bietet sich die Möglichkeit einer Gewichtung der einzelnen Höhenmodelle des paarweisen Matchings, lassen sich dabei im gesamten Gebiet hohe Vollständigkeiten und, mit Ausnahme weniger im along-track Stereopaar verdeckter Bereiche, gute vertikale Genauigkeiten mit aktuellem Charakter erreichen. In beiden Testgebieten war es möglich mit derartigen Triplet-Kombinationen hohe Vollständigkeiten und eine annäherungsweise gleiche vertikale Genauigkeit wie in along-track Oberflächenmodellen zu erlangen.

Legt man bei urbanen Oberflächen keinen Wert auf die Aktualität, bieten sich bei der Komposition der Aufnahmen größere Freiheiten. Es kann dabei in vielen Fällen komplett auf Neuaufnahmen verzichtet werden. Stehen mehrere Aufnahmen mit einem moderaten temporalen Abstand (abhängig von der jahreszeitlich bedingten, klimatisch hervorgerufenen Dynamik) in den Archiven zur Verfügung, können für ein kostenneutrales Höhenmodell (im Vergleich zu einer along-track Triplet Neuaufnahme) bis zu sechs Aufnahmen aus den Archiven kombiniert werden. Bei der Auswahl dieser Aufnahmen sollten along-track Stereo- bzw. Mehrfachstereo-aufnahmen aus den Archiven gegenüber Monoszenen (wie in Kapitel 4.2.2 vorgeschlagen) bevorzugt werden. Dabei kann durch die hohe Redundanz an Höhenwerten ein sehr vollständiges Höhenmodell erstellt werden, welches wenige Artefakte aufweist. Die Verwendung dieser hohen Anzahl an Einzelszenen bringt auch eine verbesserte Rekonstruktion der Straßenbereiche mit sich, was sich äußerst positiv auf die Ableitung von Gebäudemodellen auswirkt. In den Analysen wurde deutlich, dass bei Zeitabständen von bis zu drei Monaten sehr hohe Anteile urbaner Gebiete rekonstruiert werden können. Dabei können anthropogen beeinflusste unbefestigte Oberflächen meist schlechter rekonstruiert werden als die übrigen Features. Legt man auf diese Oberflächen großen Wert, sollte ein Zeitraum von einem Monat zwischen den Aufnahmen grundsätzlich nicht überschritten werden. Würden für die Rekonstruktion Orthophotos bereit stehen, für welche infrarote bzw. multispektrale Kanäle vorliegen, könnten für eine Fusion der einzelnen Höhenmodelle nur jeweils die

Matches eines Stereopaars für Bereiche mit Vegetationsbedeckung verwendet werden. Dieses Verfahren würde eventuell auftretende negative Effekte in Bereichen in eben diesen verhindern und somit das resultierende Höhenmodell verbessern. Dabei wäre die Vollständigkeit in diesen Bereichen zwar geringer, doch die temporal verursachten Effekte (Rauschen, Spitzen) würden minimiert werden. Es könnte interessant sein, diesen Sachverhalt zum Gegenstand weiterer Untersuchungen zu machen.

Für die Ableitung von Oberflächenmodellen, mit dem Zweck ländliche Gebiete zu rekonstruieren, welche viele Wälder, Wiesen und Felder beinhalten, sollte der zeitliche Abstand der Einzelaufnahmen auf ein Minimum reduziert werden. Die starke Dynamik sowie die radiometrische Homogenität und Texturarmut dieser Gebiete schränken die Vollständigkeit bei Höhenmodellen mit einem zu großen temporalen Abstand teilweise zu stark ein. Dennoch kommen in semiariden Gebieten Ausnahmefälle vor – denn dort sind selbst zeitliche Abstände von einem Jahr denkbar, da sich die Oberfläche in diesen Gebieten nicht so dynamisch verhält wie in gemäßigten Regionen und die Vegetationsdichte geringer ist.

Ausblick

Die Analyse von Höhenmodellen aus across-track und along-track Aufnahmen zeigt, dass die paarweise gematchten Höhenmodelle, die nach dem Matchingprozess entstehen, je nach Zeitabstand unterschiedliche Merkmale aufweisen. Da sich diese Höhenmodelle in ihrer Qualität (bei großen zeitlichen Differenzen) unterscheiden können, könnte eine gewichtete Fusion, die auf dem zeitlichen Abstand der einzelnen Höhenmodelle basiert und wie die TGV-Fusion („Total generalized variation“, KUSCHK & D'ANGELO., 2013) arbeitet, große Verbesserungen für ein resultierendes Höhenmodell bedeuten. Auch eine Fusion von Höhenmodellen aus verschiedenen Sensoren wäre auf diese Weise denkbar und könnte die Vielfalt von Kombinationsmöglichkeiten von Aufnahmen weiter stark erhöhen. Gerade deshalb, weil durch die zahlreichen zukünftigen optischen VHR-Systeme eine große Datenvielfalt und vielfache Redundanz gebildet werden, bietet sich ein sehr großes Potential darin, diese Daten untereinander zu kombinieren. Ebenso ist eine Technik denkbar, welche neben der Gewichtung des zeitlichen Abstands, eine merkmalsbasierte, gewichtete Fusion auf Grundlage von Drittdaten (beispielsweise von klassifizierten Multispektraldaten der Orthophotos) durchführt. Somit könnten zeitlich stark beeinflusste Features in verschiedenen Höhenmodellen unterschiedlich gewichtet werden und damit die Homogenität des Höhenmodells bei der Abbildung gleicher Features erhöht werden. Da die gleichförmige Abbildung von Features innerhalb einer Satellitenszene einen großen Vorteil gegenüber luftgestützten Systemen darstellt, auf Grund der Tatsache, dass sie ein sehr großes Gebiet abdeckt, könnte dieser Vorteil durch eine inhaltsbezogene und/oder metadatenbezogene, gewichtete Fusion innerhalb across-track erzeugten Höhenmodellen erhalten bleiben.

Es wäre denkbar, diese vorgeschlagenen Techniken in weiteren Untersuchungen zu überprüfen. Weil nur für ein Testgebiet ein grobes Referenzgeländemodell vorhanden war, liegt es nahe, die statistischen Analysen in Zukunft mit einem dichteren Oberflächenmodell durchzuführen. Dadurch könnten besonders die Stadtbereiche statistisch überprüft werden. Zusätzlich bieten sich bei der Prozessierung von across-track erzeugten Höhenmodellen gemäßigte oder tropische Gebiete als Testgebiete an. Diese könnten in naher Zukunft untersucht werden.

8 QUELLENVERZEICHNIS

- AGUILAR ET AL., 2014 Aguilar, M. A., del Mar Saldana, M., Fernando José Aguilar. „Generation and Quality Assessment of Stereo-Extracted DSM from GeoEye-1 and WorldView-2 Imagery”, 2014
- BALTSAVIAS ET AL., 2001 E. Baltsavias, M. Pateraki, L. Zhang, „Radiometric and geometric evaluation of IKONOS Geo images and their use for 3D building modeling”, in Proc. ISPRS Workshop High Resolution Mapping Space, 2001, pp. 1–21
- BERRY, 1987 Berry, J. K. „Fundamental operations in computer-assisted map analysis“, International Journal of Geographical Information Systems, 1. Jg., Nr. 2, 1987, S. 119-136.
- BERRY, 2007 Berry, J. K. „Beyond mapping: concepts, algorithms, and issues in GIS“. GIS World, Incorporated, 2007. S. 111 ff.
- BIRCHFIELD & TOMASI, 1999 Birchfield, S., Tomasi C. „Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo“, International Journal of Computer Vision, v.35 n.3, 1999. S. 269-293
- CAIN, 1989 Cain, J. „Stereomodel Acquisition Geometry“, Dissertation, U.C. Berkeley, 1989. S. 16 ff.
- CARL ET AL., 2013 Carl, S., Bärish, S., Lang, F., d'Angelo, P., Arefi, H., Reinartz, P. „Operational Generation of High-Resolution Digital Surface Models from Commercial Tri-Stereo Satellite Data“, In: Photogrammetric Week '13, Wichmann Verlag, 2013, pp. 261-269.
- CARTOSAT-1 DATA USER'S HANDBOOK „Cartosat-1 Data User's Handbook “ Indian space research organization, National Remote Sensing Data Center, 2006, S. 21
- COX ET & RAO, 1996 Cox, H., Rao, M. „A Maximum Likelihood Stereo Algorithm,” Computer Vision and Image Understanding, Vol. 63(3), 1996, pp. 542-567.
- D'ANGELO & KUSCHK, 2012 d'Angelo, P., Kusch, G. „Dense multi-view stereo from satellite imagery”, In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International. IEEE, 2012. S. 6944-6947.

-
- D'ANGELO & REINARTZ, 2011 d'Angelo, P., Reinartz, P. „Semi-global matching results on the ISPRS stereo matching benchmark”, In: ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information.
- D'ANGELO, 2010 d'Angelo, P. „Image Matching and Outlier Removal For large Scale DSM Generation”, In: Convergence in Geomatics, CGC & ISPRS. ISPRS Symposium Commission I, 2010
- DAVID, 1998 David, H.A., „Early sample measures of variability” Project Euclid, Statistical Sciences, Vol. 13, Nr. 4, 1998, S. 368 – 377
- DIAL & GRODECKI, 2002 Dial, G., & Grodecki, J. „IKONOS accuracy without ground control”, In Proceedings of ISPRS Commission I Mid-Term Symposium, 2002, S. 10-15
- DOLOFF ET AL., 2012 Dolloff, T., Theiss, H. J. „Temporal Correlation of Metadata Errors for Commercial Satellite Images: Representation and Effects of Stereo Extraction Accuracy”, In: ISPRS XXII Congress, 2012
- DUDA ET AL., 1995 Duda, R. O., Hart, P.E. „Pattern recognition and scene analysis”. 1995, S. 15 ff.
- FORSYTH & PONCE, 2012 Forsyth, D. A., & Ponce, J. „Computer vision: a modern approach”, Prentice Hall Professional Technical Reference. 1995, S. 167 ff.
- FRASER & HANLEY, 2005 Fraser, C. S., & Hanley, H. B. „Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005 S. 909 - 915
- GEHRKE, 2010 Gehrke, S., Morin, K., Downey, M., Boehrer, N., Fuchs, T. „Semi-global matching: An alternative to LIDAR for DSM generation” International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2010
- GRODECKI & DIAL, 2003 Grodecki, J., & Dial, G., „Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 69.1 (2003): 59-68.

-
- GRODECKI ET AL., 2004 Grodecki, J., Dial, G., Lutes, J., „Mathematical model for 3D feature extraction from multiple Satellite images described by RPCs“ Proceedings of ARPRS Annual Conference, 2004
- GRODECKI, 2001 Grodecki, J. „IKONOS stereo feature extraction-RPC approach“, In: ASPRS annual conference St. Louis, 2001
- GROHMAN ET AL., 2006 Grohman G., Kroenung, G., Strebeck, J.. „Filling SRTM voids: The delta surface fill method“, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72. Jg., Nr. 3, S. 213-216
- HAALA, 2013 Haala, N.: „The Landscape of Dense Image Matching Algorithms“, In: Photogrammetric Week '13, Wichmann Verlag. Photogrammetric Week 2013, Stuttgart, Deutschland. ISBN 978-3-87907-531-7., 2013, S. 261-269
- HANEBERG, 2004 Haneberg, W. C. „Computational geosciences with Mathematica“ Vol. 1. Springer, 2004, S.34 ff.
- HANSEN ET AL., 2012 Hansen, P. C., Pereyra, V., Scherer, G. „Least squares data fitting with applications“, JHU Press, 2012, S. 4 ff.
- HIRSCHMÜLLER & BUCHER, 2010 Hirschmüller, H., & Bucher, T. „Evaluation of digital surface models by semi-global matching.“ DGPF Tagungsband 19, 2010, S. 571-580.
- HIRSCHMÜLLER & SCHARSTEIN, 2007 Hirschmüller, H. & Scharstein, D. „Evaluation of cost functions for stereo matching“, In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2007
- HIRSCHMÜLLER ET AL., 2012 Wohlfeil, J., Hirschmüller, H., Piltz, B., Börner, A., Suppa, M., „Fully automated generation of accurate digital surface models with sub-meter resolution from satellite imagery“ In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX (B3), 2012, S. 75-80.
- HIRSCHMÜLLER, 2005 Hirschmüller, H. „Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information“ In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. S. 807-814.
- HIRSCHMÜLLER, 2008 Hirschmüller, H. „Stereo processing by Semi-global matching and mutual information“ Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30. Jg., 2008, S. 328-341.

-
- HIRSCHMÜLLER, 2011 Hirschmüller, H. „Semi-Global Matching - Motivation, Developments and Applications”, Photogrammetric Week 11, Wichmann Verlag, 2011, S. 173-184.
- HOAGLIN ET AL., 2000 Hoaglin, D. C.; Mosteller, F.; Tukey, John W., „Understanding robust and exploratory data analysis”, New York: Wiley, 2000, S. 211 ff.
- HOBİ & GINZLER., 2012 Hobi, M. L. & Ginzler, C. „Accuracy assessment of digital surface models based on WorldView-2 and ADS80 stereo remote sensing data." Sensors (Basel), 2012, S. 6347-6368.
- HÖHLE & HÖHLE, 2009 Höhle, J. & Höhle, M. „Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64. Jg., Nr. 4, 2009, S. 398-406.
- HÖHLE & POTUCKOVA, 2009 Höhle, J. & Potuckova, M. „The EuroSDR Test: "Checking and Improving of Digital Terrain Models"", Gopher, 2009
- JACOBSEN, 2005 Jacobsen, K. „High Resolution Satellite Imaging Systems-an Overview” Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 2005, S. 487.
- JACOBSEN, 2013 Jacobsen, C. „Erstellung großflächiger Höhenmodelle und Vergleich mit anderen Daten“ in DGPF Tagungsband 22, 2013
- JIAOJIAO ET AL., 2014 Tian, J., Cui, S., Reinartz, P. „Building change detection based on satellite stereo imagery and digital surface models” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52 (1), 2014, S. 406-417
- KAREL ET AL., 2006 Karel, W., Pfeifer, N., Briese, C. „DTM Quality Assessment” ISPRS Technical Commission II Symposium, Vienna, 2006
- KRAUß ET AL., 2013 Krauß, T., d'Angelo, P., Schneider, M., & Gstaiger, V. „The Fully Automatic Optical Processing System CATENA at DLR”. ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, 2013, S. 177-181.
- KURZ, 2009 Kurz, F. „Accuracy assessment of the DLR 3K camera system” DGPF Tagungsband, 18. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation Jahrestagung, 2009.

- KUSCHK & D'ANGELO, 2013 Kuschik, G. & d'Angelo, P. „Fusion of Multi-Resolution Digital Surface Models” ISPRS Archives, XL-1/W, 2013, S. 247-251.
- LEWIS, 1995 Lewis, J. P. „Fast normalized cross-correlation” In: Vision interface. 1995. S. 120-123.
- LI ET AL., 2009 Li, R., Niu, X., Liu, C., Wu, B., Deshpande, S. „Impact of imaging geometry on 3D geopositioning accuracy of stereo IKONOS imagery” Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 75. Nr. 9, 2009, S. 1119-1125.
- MORGAN, 2004 Morgan, M. F. „Epipolar resampling of linear array scanner scenes” Dissertation, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2004, S. 123 ff.
- MOUNT ET AL., 2008 Mount, N., Harvey, G., Aplin, P., Priestnall, G. „Representing, Modeling, and Visualizing the Natural Environment” CRC Press, 2008
- MÜLLER, 2008 Müller, A. „Modell zur Genauigkeitsvorhersage von hochauflösenden Satellitenbilddaten“, Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2008, S. 13 ff.
- NGA, 2011 NGA Standardization Document, The Compendium of Controlled Extensions (CE) for the National Imagery Transmission Format (NITF) Volume 1, Tagged Record Extensions (2011-08-01) Version 4.0, STDI-0002-1 Appendix E: ASDE 2.1/CN1 August 2011, S. 17
- PODOBNIKAR, 2009 Podobnikar, T. „Methods for visual quality assessment of a digital terrain model” SAP IEN. S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society, (2.2), 2009
- RAGGAM, 2006 Raggam, H. „Surface mapping using image triplets: case studies and benefit assessment in comparison to stereo image processing.” Photogrammetric engineering and remote sensing 72.5, 2006, S. 551 ff.
- REES, 2013 Rees, G., & Rees, W. G. „Physical principles of remote sensing” Cambridge University Press, 2012, S. 322 ff.

-
- REINARTZ ET AL., 2010 Reinartz, P., d'Angelo, P., Krauß, T., Poli, D., Jacobsen, K. Buyuksalih, G. „Benchmarking and quality analysis of DEM generated from high and very high resolution optical stereo satellite data." ISPRS Symposium Commission I. Nr. 3. 2010.
- RICHARDS, 2013 John R., „Remote Sensing Digital Image Analysis, An introduction", fünfte Edition, Springer, Canberra, 2013, S.47 - 56
- RÖSLER, 2011 Frank R., 2011 „Psychophysiologie Der Kognition: Eine Einführung in Die Kognitive Neurowissenschaft", Springer DE, S. 67 ff.
- RUNKLER, 2009 Runkler, T. „Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse", Springer DE, 2009, S.23 ff.
- SANDAU, 2005 Sandau, R. (Hrsg.). „Digitale Luftbildkamera" Wichmann, 2005, S. 99 ff.
- SCHARSTEIN &
SZELISKI 2002 Scharstein, D., Szeliski, R. „A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms" International journal of computer vision, 47. Jg., Nr. 1-3, 2002, S. 7-42.
- SCHARSTEIN &
SZELISKI 2003 Scharstein, D., and Richard S. „High-accuracy stereo depth maps using structured light." Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition. Nr. 1, IEEE, 2003
- SINGH, 2008 Singh, G. „Improved Geometric Modeling of Spaceborne Pushbroom Imagery using modified Rational Polynomial Coefficients and the Impact on DSM Generation", Masterthesis, International Institute for Geoinformation science and Earth Observation, Enschede, 2008, S. 14 ff.
- SZELISKI, 2011 Szeliski, R. „Computer vision: algorithms and applications" Springer, 2011, S. 437 ff.
- VEKSLER & ZABIH,
2001 Boykov, Y., Veksler, O., Zabih, R. „Fast approximate energy minimization via graph cuts", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 23(11), 2001, S. 1222-1239.
- VIOLA & WELLS, 1997 Viola, P. & Wells, M. "Alignment by maximization of mutual information", International journal of computer vision, 1997, S. 137 - 154

- WENZEL ET AL., 2013 Wenzel, K., Rothmel, M., Fritsch, D., „SURE-The ifp Software for Dense Image Matching” In: D. Fritsch (Ed.), Photogrammetric Week 2013, Wichmann, 2013, S. 59-70.
- ZABIH & WOODFILL, 1994 Zabih, R.; Woodfill, J. „Non-parametric local transforms for computing visual correspondence” In: Computer Vision-ECCV'94. Springer, 1994. S. 151-158
- ZABIH & WOODFILL, 1996 Zabih, R., Woodfill, J. „A non-parametric approach to visual correspondence”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996
- ZHU ET AL., 2008 Zhu, L., Umakawa, H., Guan, F., Tachibana, K., Shimamura, H. „Accuracy Investigation of Orthoimages Obtained from High Resolution Satellite Stereo Pairs”, the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 2008
- ZHU ET AL., 2012 Zhu, K., d'Angelo, P., Buthenuth, M. „Evaluation of Stereo Matching Costs on Close Range, Aerial and Satellite Images”, International Conference on Pattern Recognition (ICPRAM), 2012, S. 379-385.